



HAL
open science

Définition d'un cahier des charges d'optimisation des process de régulation dans les stations de pompage des réseaux d'irrigation collectifs sous pression

Victor Mascaro

► **To cite this version:**

Victor Mascaro. Définition d'un cahier des charges d'optimisation des process de régulation dans les stations de pompage des réseaux d'irrigation collectifs sous pression. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03550790

HAL Id: dumas-03550790

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03550790v1>

Submitted on 1 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

DEFINITION D'UN CAHIER DES CHARGES D'OPTIMISATION DES PROCESS DE REGULATION DANS LES STATIONS DE POMPAGE DES RESEAUX D'IRRIGATION COLLECTIFS SOUS PRESSION



Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Victor MASCARO
Promotion Grand Lyon
Formation par apprentissage

Tuteur école : Jean-Bernard Bardiaux
Maître d'apprentissage : Franck Falcou

Octobre 2019





Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie M. Franck Falcou, gérant du cabinet CA EAU, pour les conditions d'autonomie qu'il a su mettre en place et pour les libertés qu'il m'a laissées.

Je remercie M. Fabien Fournet, salarié du cabinet CA EAU, pour ses conseils et sa bienveillance.

Je suis reconnaissant envers M. Fabien Thomazet, responsable technique de l'Association Syndicale d'Irrigation de l'Ain, pour sa collaboration en me fournissant des données techniques qui m'ont été très utiles.

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique de l'ENGEES, et plus particulièrement Jean-Bernard Bardiaux et Caty Wery pour leur accompagnement.

Je remercie aussi toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de mon mémoire pour les échanges productifs que nous avons eus, les avis critiques qu'ils ont formulés, ainsi que pour leur relecture attentive.

Enfin, je remercie mes parents pour m'avoir encouragé et permis d'entreprendre cette formation d'ingénieur hydraulicien. Sans eux je n'en serais pas là.





Résumé

Définition d'un cahier des charges d'optimisation des process de régulation dans les stations de pompage des réseaux d'irrigation collectifs sous pression

La charge hydraulique d'un réseau d'irrigation peut varier de 0 à 100 %. Ce fonctionnement à la demande impose une adaptation permanente des débits et des pressions distribuées par les stations de pompage. Par conséquent, l'intégration des principes de régulation par variation de vitesse des pompes est indispensable. Cependant, ces technologies sont parfois mal maîtrisées par les installateurs. La régulation n'est alors pas optimisée énergétiquement et les pompes subissent des contraintes mécaniques accrues.

L'étude de cas relative à la station de pompage créée en 2018 pour le compte de l'Association Syndicale d'Irrigation de l'Ain a exposé plusieurs défauts. En effet, le mode de régulation actuel est source de gaspillage énergétique car il distribue des pressions inutilement élevées sur le réseau. De plus, il impose aux pompes un fonctionnement à des débits situés bien en dehors de la plage recommandée par le constructeur.

Deux optimisations des modes de régulation quasiment similaires du point de vue économique et technique sont proposées. Le premier mode n'impose pas de modifier le matériel de pompage déjà présent dans la station car il nécessite l'utilisation d'un seul variateur de vitesse. En revanche, il engendre des variations de pression forte sur le réseau. Le second mode nécessite la mise en place de deux variateurs de vitesse. Malgré leur fragilité, ils offrent un fonctionnement hydraulique plus stable ainsi qu'une diminution des contraintes mécaniques sur les pompes qui en sont équipées. La mise en place de chacun de ces deux modes de régulation permettra d'épargner 300 MWh/an, ce qui représente une économie de 6500 €/an.

Le cahier des charges impose donc aux installateurs la mise en place d'un mode de régulation énergétiquement optimisé, tout en assurant le bon fonctionnement des pompes.

Abstract

Definition of specifications for the optimization of regulation processes in pumping stations of pressurized collective irrigation networks

The hydraulic load of an irrigation system can vary from 0 to 100%. This demand-driven operation requires a permanent adaptation of the flows and pressures distributed by the pumping stations. Therefore, the integration of variable speed controlled pumps regulation principles is essential. However, these technologies are sometimes poorly mastered by installers. Then, the regulation cannot be energetically optimized and the pumps undergo increased mechanical stresses.

The case study of the pumping station created in 2018 on behalf of the Association Syndicale d'Irrigation of Ain exposed several faults. In fact, the current mode of regulation is a source of energy waste because it distributes unnecessarily high pressures on the network. In addition, it requires pumps to operate at flow rates well outside the range recommended by the manufacturer.

Two optimizations of regulation methods are proposed. They are almost similar from an economic and technical point of view. The first method does not require modifying the pumping equipment that is already present in the station. It is due to the use of a single variable speed drive. On the other hand, it generates strong pressure variations on the network. The second method requires the installation of two variable speed drives. Despite their fragility, they offer a more stable hydraulic operation as well as a reduction in mechanical stresses on the pumps that are equipped with them. The implementation of each of these two methods of regulation will save 300 MWh/year, which represents a savings of 6500 €/year.

The specifications therefore impose on installers the implementation of an energy-optimized method of regulation, while ensuring the proper functioning of the pumps.



Table des matières

LEXIQUE.....	9
PARTIE I : GENERALITES DES RESEAUX D'IRRIGATION	11
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	11
1.1. OBJECTIFS DU PROJET.....	11
1.2. LE CABINET CA EAU.....	11
1.3. ORIGINE DU PROJET	11
CHAPITRE 2 : GENERALITES DES RESEAUX D'IRRIGATION SOUS PRESSION	13
2.1. LE PRINCIPE DE L'IRRIGATION.....	13
2.2. COMPOSITION D'UN RESEAU D'IRRIGATION SOUS PRESSION	13
2.3. DEBIT DU RESEAU	14
2.4. PRESSION DU RESEAU	15
CHAPITRE 3 : LA STATION DE POMPAGE	16
3.1. COMPOSITION	16
3.2. DETAILS DU MONTAGE DES POMPES.....	17
3.3. LES POMPES	17
3.3.1 <i>Typologie de pompes</i>	17
3.3.2 <i>Détermination mécanique des pompes</i>	18
3.3.3 <i>Limites d'utilisation des pompes :</i>	18
CHAPITRE 4 : LES PRINCIPES DE LA REGULATION	19
4.1. DEFINITION GENERALE DE LA REGULATION.....	19
4.2. REGULATION D'UNE SEULE POMPE A VITESSE FIXE.....	19
4.3. REGULATION DU DEBIT PAR CASCADE DE POMPE	19
4.4. REGULATION DU DEBIT PAR VARIATION DE VITESSE	20
4.5. ETUDE DE L'UTILISATION DE POMPES A VITESSE VARIABLE.....	21
4.5.1 <i>Courbe de régulation</i>	23
4.5.2 <i>Les autres avantages</i>	23
PARTIE II : ETUDE DE LA REGULATION DE LA STATION DE POMPAGE DE L'ASSOCIATION SYNDICALE D'IRRIGATION DE L'AIN (ASIA)	25
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	25
1.1.1 <i>Implication personnelle</i>	25
CHAPITRE 2 : COURBE DE RESEAU.....	26
2.1. DETERMINATION DE LA COURBE RESEAU	26
2.2. ANALYSE DES HYPOTHESES DU MODELE HYDRAULIQUE.....	27
2.2.1 <i>Détail des hypothèses d'entrées</i>	27
2.2.2 <i>Limite de la méthode</i>	27
2.2.3 <i>pertinence du choix du coefficient de rugosité</i>	27
CHAPITRE 3 : LA STATION ET LES POMPES.....	29
3.1. DECOUPAGE DES GROUPES DE POMPAGE PRINCIPAUX	29
3.2. CONSTRUCTION DU GRAPHIQUE DES DIFFERENTES COURBE DE POMPE	30
CHAPITRE 4 : ANALYSE TECHNIQUE DE LA REGULATION MISE EN PLACE	31
4.1. ANALYSE DE LA COURBE DE REGULATION MISE EN ŒUVRE DANS LE CADRE DES TRAVAUX	31

4.2.	ANALYSE DES SEUILS DE MARCHÉ MIS EN ŒUVRE DANS LE CADRE DES TRAVAUX	32
4.2.1	Seuils d'enclenchement.....	32
4.2.2	Analyse du graphique de la régulation en place	33
4.2.3	Agrandissement des seuils de régulation anormaux :.....	34
4.3.	GRAPHIQUE DE RÉGULATION AVEC LES SEUILS CORRIGÉS	35
CHAPITRE 5 : ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA STATION EN PLEINE SAISON D'IRRIGATION 2018		36
5.1.	HISTOGRAMME DES SOLlicitATIONS	36
5.2.	PROFILS DÉBIT ET HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS.....	37
5.2.1	Profil de consommation	37
5.2.2	Pompe de maintien de pression	38
5.2.3	Evolution de la pression avec et sans variateur de vitesse.....	38
5.3.	LES CONSÉQUENCES DE LA RÉGULATION SUR LES PRESSIONS DISTRIBUÉES	40
CHAPITRE 6 : AXES D'AMÉLIORATION ÉNERGÉTIQUE.....		42
6.1.	PARAMÈTRES D'AMÉLIORATION ÉNERGÉTIQUE.....	42
6.1.1	Puissance de l'installation.....	42
6.1.2	Paramètre d'influence.....	42
6.2.	RÉDUCTION DE LA PRESSION.....	43
6.3.	ÉVOLUTION DU RENDEMENT	43
6.4.	PRÉSENTATION DE L'OUTIL DE CALCUL	45
CHAPITRE 7 : OPTIMISATION DE LA COURBE DE RÉGULATION		47
7.1.	DÉFINITION DES CAS ÉTUDIÉS.....	47
7.1.1	Étude du cas théorique	47
7.1.2	Étude du cas réel.....	47
7.1.3	Présentation des résultats.....	47
7.2.	MODES DE RÉGULATION ÉTUDIÉS	47
7.3.	COMPARAISON DES MODES DE RÉGULATION	48
7.3.1	Régulation débitmétrique.....	48
7.3.2	Régulation à pression constante.....	49
7.3.3	Droite linéaire brisée similaire à la régulation actuelle.....	50
7.3.4	Régulation par fonction linéaire.....	51
7.4.	RÉGULATION PAR FONCTION PARABOLIQUE.....	52
7.5.	CRITIQUE.....	53
PARTIE III : PRÉSENTATION DES SOLUTIONS.....		55
CHAPITRE 1 : PROPOSITION DE MODES DE RÉGULATION		55
1.1.	SOLUTION AVEC UNE POMPE À VITESSE VARIABLE : S1Vv.....	55
1.2.	SOLUTION AVEC DEUX VARIATEURS DE VITESSE : S2Vv	56
1.3.	SOLUTION IDÉALE HYPOTHÉTIQUE.....	56
1.4.	ÉTUDE ÉCONOMIQUE	57
1.4.1	Facturation heures pleines / heures creuses	57
1.4.2	Calcul des gains financiers	57
1.4.2.1.	Méthode des volumes	57
1.4.2.2.	Méthode basées sur les temps.....	58
1.4.3	Impact technico-économique de l'ajout d'un variateur de vitesse	58
CHAPITRE 2 : RÈGLES DE CONCEPTION DES INSTALLATIONS – CAHIER DES CHARGES		60
2.1.	OPTIMISATION DE LA COURBE DE RÉSEAU	60
2.2.	DÉBITS MINIMAL ET MAXIMAL DES POMPES	60
2.3.	CAHIER DES CHARGES	61
2.4.	CONCLUSION.....	62
BIBLIOGRAPHIE.....		64
ANNEXES.....		66
ANNEXE 1 :	GRAPHIQUES DES PRINCIPES DE RÉGULATION	67
ANNEXE 2 :	PLAN DU RÉSEAU D'IRRIGATION DE L'ASIA.....	68
ANNEXE 3 :	FICHE TECHNIQUE DES POMPES	69
ANNEXE 4 :	GRAPHIQUE DE RÉGULATION ÉMIS PAR L'INSTALLATEUR.....	71
ANNEXE 5 :	FICHE TECHNIQUE DU DÉBITMÈTRE	73
ANNEXE 6 :	CODAGE VBA.....	75

Lexique

Sigles :

ASIA : Association Syndicale d'Irrigation de l'Ain

DCE : Document de Consultation des Entreprises

Phase PRO : Etude de PROJET – Elément de mission de maîtrise d'œuvre

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

Courbe QH : Courbes caractéristiques des pompes appelées courbe débit (Q) hauteur (H)

DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés

Notations :

Hg : Hauteur géométrique

HMT : Hauteur Manométrique Totale

PdCl : Pertes de charge linéaires

PdCs : Pertes de charge singulières

PdCi : Pertes de charge internes aux bornes

Pr : Pression résiduelle

Cst : Constante

Vv : Vitesse variable

Vf : Vitesse fixe

mCE : mètre de colonne d'eau

Pabs : Puissance absorbée

Pu : Puissance utile

Papp : Puissance apparente

Rh : Rendement hydraulique

Rm : Rendement mécanique

$\cos\phi$: Facteur de puissance du moteur

S1Vv :

S2Vv



Partie I : GENERALITES DES RESEAUX D'IRRIGATION

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1. OBJECTIFS DU PROJET

« Contrairement à l'apparente simplicité des ouvrages, le fonctionnement d'un réseau d'irrigation nécessite un ensemble d'actions concertées automatiques ou manuelles, qui deviennent de plus en plus complexes avec le niveau de performance recherché. » (La Houille Blanche, n°8, 1996)

Les réseaux d'irrigation sont des réseaux à la demande, ainsi ils peuvent voir leur charge hydraulique évoluer de 0 à 100% au cours d'une journée. De plus de lourdes contraintes de pression doivent être satisfaites à chaque instant. C'est généralement la solution de la régulation des stations de pompage qui est choisie pour les raisons suivantes (La Houille Blanche n°2 1993) :

- ↘ La baisse de la consommation énergétique au travers d'une meilleure maîtrise des pressions et des rendements,
- ↘ La réduction de personnel au travers de l'automatisation des stations,
- ↘ L'adaptabilité du fonctionnement des stations dans le temps face à l'évolution des demandes.

Malheureusement certains principes de régulation impliquent des consommations énergétiques superflues au niveau des installations. De plus certains principes sont mal maîtrisés par les différents intervenants des projets d'irrigation, ce qui peut causer des défauts de fonctionnement des installations ainsi que des usures prématurées des équipements de pompage. Par conséquent le cabinet CA EAU souhaite encadrer et améliorer le volet de la régulation des pompes dans ses Documents de Consultation des Entreprises (DCE) afin de proposer des solutions techniquement pérennes et énergétiquement optimisées.

L'objectif de ce projet est donc d'étudier le cas réel d'une station de pompage afin de mettre en évidence et de définir un cahier des charges d'optimisation des processus de régulation. Son but est de garantir le bon fonctionnement des stations de pompage des réseaux d'irrigation collectifs sous pression et cela de la façon la plus économique possible. Pour se faire un outil de calcul sera mis en place afin de pouvoir comparer efficacement différents modes de régulations.

Le sujet étant très technique, la première partie de ce document se concentrera sur des notions introductives aux réseaux d'irrigation et aux problématiques de régulation. Une fois les bases éclaircies la seconde partie portera sur l'étude de cas, puis la rédaction du cahier des charges sera détaillée en troisième partie.

1.2. LE CABINET CA EAU

Le cabinet CA EAU réalise des missions d'études et de maîtrise d'œuvre pour des clients tels que les Associations Syndicales Autorisées (ASA) et les Syndicats d'Irrigation. Ces structures regroupent des propriétaires terriens dans un but d'aménagement du territoire, et plus précisément dans le cas de la création et de la gestion de patrimoine d'irrigation (prise d'eau, station de pompage, réseau de canalisations, bornes d'irrigation).

1.3. ORIGINE DU PROJET

Dans une logique de développement durable, le cabinet CA EAU souhaite s'assurer de la légitimité et de la cohérence des projets qu'il propose, du point de vue de la consommation d'eau et d'énergie.

Il est difficilement possible de réduire les volumes d'eau en jeu lorsque les réseaux ne présentent pas de fuites, ou du moins de fuites importantes. Il est donc nécessaire de s'interroger sur le potentiel d'économies énergétiques



de ces installations sous pression. L'énergie étant le principal poste de dépense au cours du cycle de vie d'un système de pompage, c'est donc le point sur lequel des efforts d'amélioration seraient les plus efficaces. Mais quel est alors le lien avec la régulation des réseaux d'irrigation ?

« La régulation est synonyme de contrôle, ou mieux, de maîtrise du fonctionnement d'un réseau d'irrigation » (La Houille Blanche n°8 1996)

Elle est donc le levier à actionner pour répondre à notre problématique énergétique. Il nous est alors nécessaire d'étudier le volet de la régulation des pompes dans les projets que nous traitons afin de mettre en évidence les éventuelles économies à réaliser.

Les réseaux d'irrigation sont différents des réseaux d'eau potable de par leur typologie, leur fonctionnement, leur répartition des débits etc...Cela fait de l'irrigation un domaine d'activité à part entière. Il est donc nécessaire de présenter le fonctionnement des réseaux d'irrigation de façon générale afin d'éclaircir ce sujet et de le rendre accessible à tous, même aux profanes en la matière.

Le cabinet CA EAU souhaite mettre en place une optimisation technique et énergétique de la régulation des réseaux d'irrigation collectifs.

CHAPITRE 2 : GENERALITES DES RESEAUX D'IRRIGATION SOUS PRESSION

2.1. LE PRINCIPE DE L'IRRIGATION

Le principe de l'irrigation est d'amener de l'eau depuis une ressource vers un point de distribution dans le but d'alimenter des cultures. Les systèmes d'irrigation se classent selon deux catégories :

- *Les réseaux gravitaires de canaux à ciel ouvert,*
- *Les réseaux sous pression de canalisations.*

Les réseaux de canaux à ciel ouvert permettent une irrigation de surfaces des cultures par ruissellement, submersion ou infiltration. Ce moyen n'est pas très efficace et reste très consommateur en eau. De plus les canaux à ciel ouvert ont un fonctionnement gravitaire et leurs tracés suivent les courbes de niveau, ils sont soumis à la topographie. De ce fait, ils présentent un temps de réponse très important qui n'est pas compatible avec les attentes des irrigants. Les réseaux de canaux à ciel ouvert ne sont donc pas étudiés dans le cadre du TFE.

Quant aux réseaux de canalisations sous pression, ils offrent une meilleure gestion de l'eau et ainsi une diversification de la production au niveau des parcelles. Ils permettent d'apporter des débits pouvant être très variables et adaptés à chaque parcelle et type de culture. De plus leur efficacité est grande compte tenu des faibles fuites qu'ils engendrent. Ces réseaux nécessitent souvent une énergie extérieure afin de fournir une pression adéquate en sortie de réseau pour assurer le bon fonctionnement des équipements d'irrigation. (*Phocaïdes 2008, La Houille Blanche n°8 1996*)

Le présent document ne concerne que ce type de réseau.

2.2. COMPOSITION D'UN RESEAU D'IRRIGATION SOUS PRESSION

Un réseau sous pression se compose de (*Phocaïde 2008*) :

- *Une ressource en eau brute. Cette dernière peut être une rivière, une retenue collinaire, nappe phréatique, etc à condition que la qualité de l'eau convienne aux exploitations et que l'autorisation de prélèvement permette un apport suffisant,*
- *Un ouvrage de prélèvement de l'eau dans la ressource et qui peut apporter un traitement mécanique à l'eau (siphon, dégrillage),*
- *Une unité de pompage qui a pour but de mettre en pression le réseau et de fournir le débit nécessaire aux cultures. C'est cette dernière qui nous intéresse car c'est elle qui peut disposer de pompes à vitesse variable dans le cas de l'irrigation,*
- *Un ensemble de conduites, souvent de type ramifié, qui transporte et distribue l'eau,*
- *Les bornes d'irrigation et autres hydrants servant à la distribution de l'eau,*
- *Les équipements de distribution (aspersion, micro-irrigation, enrouleur) dont la pression de service peut s'élever jusqu'à 10 bars.*

Lorsque les pressions à fournir et la hauteur géométrique (Hg) entre la ressource et les points de soutirage sont importantes, la solution « exhaure et reprise » est souvent envisagée. Elle consiste à créer deux stations de pompage. La première, appelée « station d'exhaure », généralement située proche de la ressource, a pour but de prélever de l'eau dans cette dernière et de l'envoyer vers la bête de la seconde station, appelée « station de reprise ».

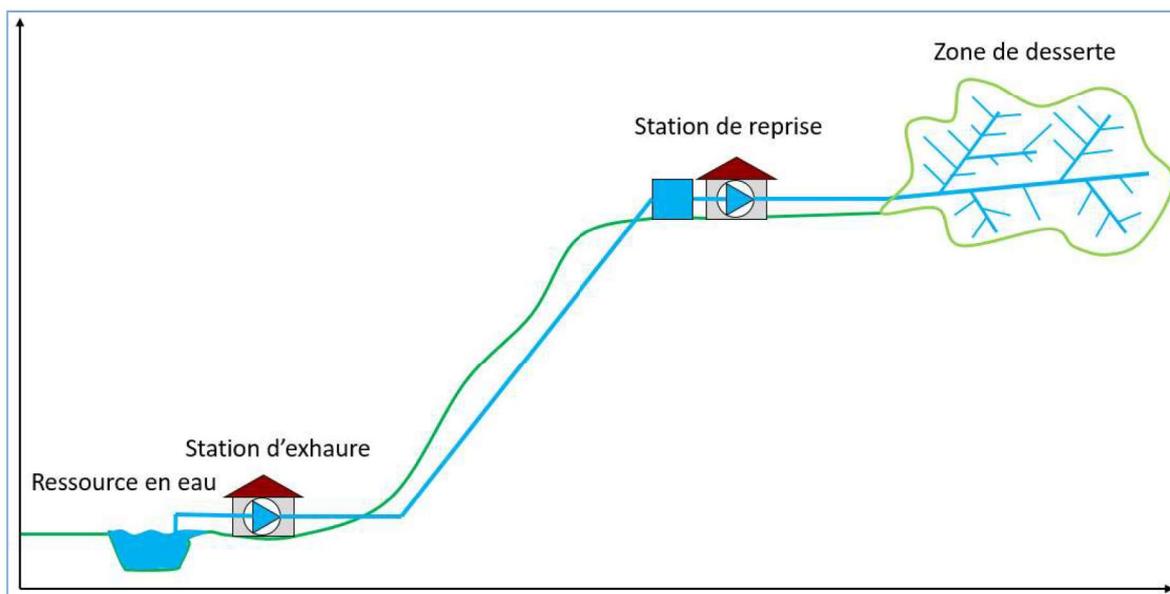


Figure 1: Schéma de principe du fonctionnement Exhaure-Reprise des stations de pompages d'eau brute

Le fonctionnement hydraulique de la station d'exhaure est généralement simple, les pompes sont dimensionnées pour fonctionner à leur débit nominal. Le fonctionnement est piloté par le niveau de l'eau dans la bêche de reprise. L'eau est ensuite distribuée sur le réseau grâce à la station de reprise. Cette dernière est située plus en altitude, à un lieu permettant d'alimenter le plus facilement possible tous les points de sous-tirage. C'est elle qui assure le rôle de pompage à la demande, et dont la conception nécessite de mettre en place un des principes de régulation présentés plus bas.

Lorsque la configuration topographique le permet, il est possible d'avoir des réservoirs d'alimentation situés en bout de réseau à une altitude suffisamment élevée pour assurer de bonnes conditions de pression dans les bornes. Ce principe est difficile à mettre en place car il est soumis aux contraintes topographiques et il engendre des surcoûts lors de la création du réseau.

2.3. DEBIT DU RESEAU

La charge hydraulique dans un réseau d'irrigation peut varier de 0 à 100%. En effet, il est possible que la nuit le débit demandé soit faible voire nul puis qu'en journée il augmente très rapidement jusqu'au débit nominal de la station lorsque tous les irrigants demandent du débit. Parfois hors saison d'irrigation, certains exploitants demandent un débit faible afin d'alimenter par exemple des abreuvoirs à bétail. La station doit aussi compenser les fuites afin de conserver la pression dans le réseau lorsque le débit appelé est nul. Les débits peuvent donc être stables, faibles ou forts, mais aussi très évolutifs sur une plage de temps réduite. Afin de dimensionner le réseau, il est nécessaire de connaître les débits qui doivent transiter vers les bornes. La détermination des capacités du réseau fait d'abord appel à des notions d'agronomie. Il faut déterminer les besoins en eau des cultures selon les paramètres suivants (Doorenbos et Pruitt 1977) :

- Le climat
- Le sol
- Le type de culture

Cela permet de déterminer le débit fictif continu correspondant aux besoins en eau de la totalité du périmètre desservi. Cependant le type de culture des parcelles étant évolutif dans le temps, il est courant de considérer la situation la plus défavorable. Pour ce faire on choisit un débit fictif d'équipement appliqué à l'échelle du territoire irrigué, et les bornes implantées sont alors toutes similaires. En fonction du nombre de points de distribution, du nombre d'irrigants et des équipements d'irrigation, le calcul des débits et donc le dimensionnement des canalisations peuvent être faits en considérant l'une des hypothèses suivantes :

- Toutes les bornes seront un jour ouvertes en même temps (lorsque le réseau dispose de peu de bornes par exemple)
- La probabilité d'ouverture de bornes sur le réseau lorsque les chances d'ouverture simultanée de toutes les bornes sont très faibles donc en appliquant la formule de R.Clément (La Houille Blanche n°5 1966)
- La situation la plus défavorable par sous-secteurs et par antennes.

2.4. PRESSION DU RESEAU

La pression résiduelle en sortie des bornes joue un rôle prépondérant dans le bon fonctionnement du réseau et des matériels d'irrigation qui sont utilisés. Par exemple, les enrouleurs d'irrigation doivent disposer d'une pression d'entrée comprise entre 7 et 10 bars pour offrir un fonctionnement adéquat. (Catalogue Irrifrance série 2000) Les systèmes de goutte à goutte nécessitent des pressions comprises entre 0,8 et 3,5 bars. (Agricontrôle.fr)

Afin de s'assurer d'obtenir des pressions résiduelles adaptées au fonctionnement du réseau, la Hauteur Manométrique Totale (HMT) des pompes qui seront installées est calculée par rapport au point le plus défavorable du réseau. En effet, si les conditions de pression sont respectées au point le plus défavorable, elles le seront aussi pour toutes les autres bornes. Ce point correspond au point de soutirage (borne) présentant la pression résiduelle la plus faible. Il est situé généralement :

- le plus loin de la station, là où les pertes de charges sont maximisées,
- le plus haut, là où la hauteur géométrique est maximisée.

La détermination de la HMT des pompes équivaut à déterminer le point de fonctionnement de la station. Pour cela on définit une courbe de réseau à l'aide des outils de modélisation en choisissant les hypothèses de calcul suivantes :

- Coefficient de rugosité $k=0.1$ mm,
- Coefficient de perte de charge linéaire valant 10% de la valeur de pertes de charge linéaire,
- Perte de charge interne à la borne d'un bar,
- Pression résiduelle en sortie des bornes de 1 à 10 bars.

Il est assez courant de voir des pressions en sortie de station de pompage de l'ordre de 100 à 200 mHMT (en considérant 100m de pression résiduelle, 50 m de pertes de charge et 50 m de hauteur géométrique). Les pertes de charge évoluent selon le carré du débit. A faible débit, les pertes de charge sont quasiment nulles, la pression nécessaire est diminuée de 50m. Les variations de pression sont donc très importantes en fonction du débit et la réponse à ces exigences est apportée par la station de pompage et sa régulation.

La configuration d'un réseau d'irrigation sous pression permet d'adapter les débits distribués à la forte variation de la demande, le tout avec des pressions pouvant atteindre 200 mHMT.

CHAPITRE 3 : LA STATION DE POMPAGE

Une station de pompage est façonnée par l'environnement dans lequel elle est implantée. La topographie et la nature du sol, ainsi que le fonctionnement attendu du réseau ont un impact sur son architecture et ses choix constructifs. Les éléments qui la composent sont dimensionnés selon de nombreux paramètres (le point de fonctionnement, la nature des eaux, le niveau d'eau de la ressource, le fonctionnement attendu, etc...)

3.1. COMPOSITION

Le plan présenté ci-dessous correspond à celui de l'étude de cas qui sera détaillée en partie 2. Il illustre de façon claire la composition et le fonctionnement d'une station de pompage en irrigation.

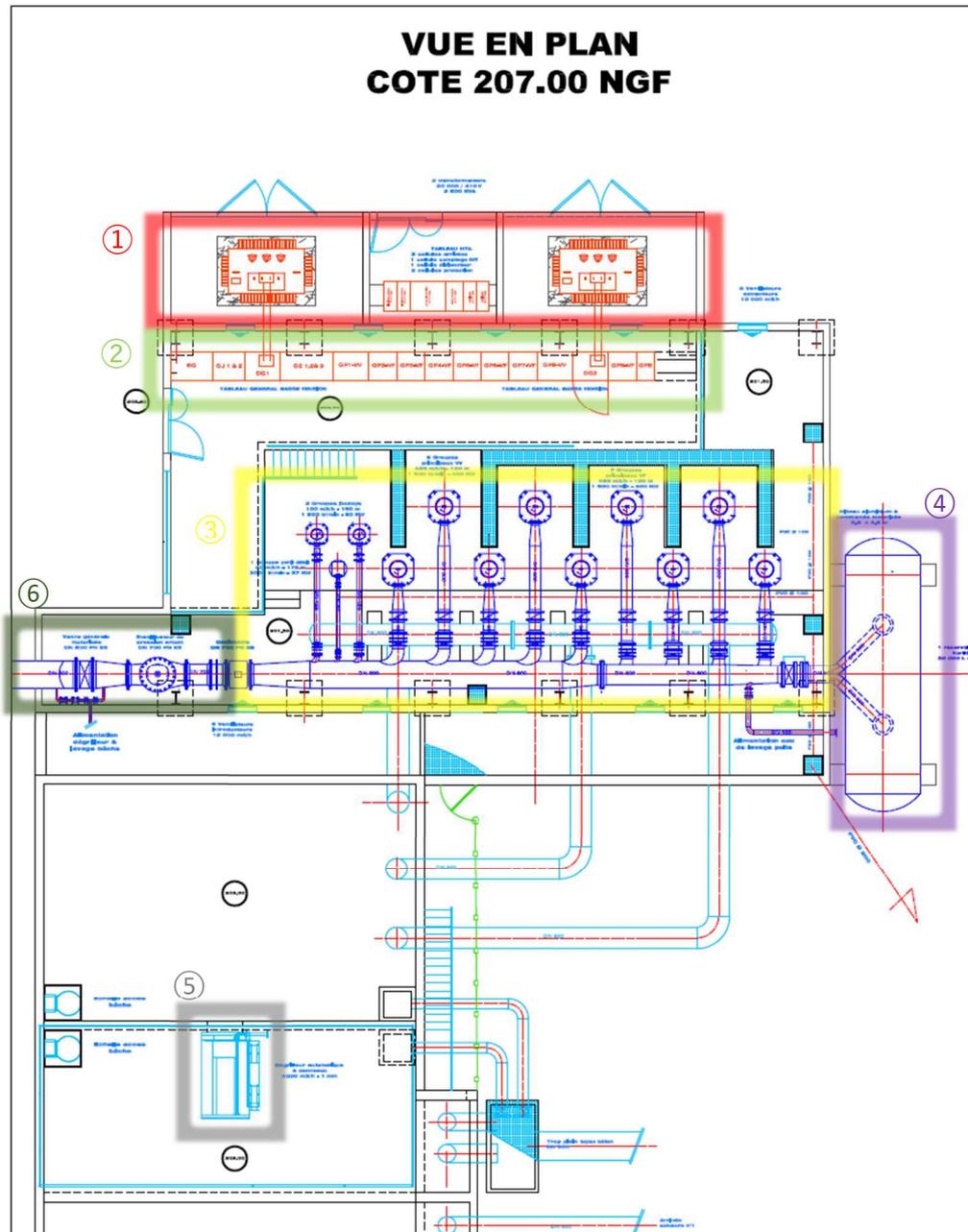


Figure 2: Vue en plan d'une station de pompage d'irrigation

Tout d'abord, l'énergie électrique arrive à la station en haute tension. Le transformateur, en zone ①, modifie le courant en basse tension pour qu'il puisse alimenter les moteurs des pompes. Le courant passe ensuite dans les armoires composées des cellules de puissance, des dispositifs de commande et des disjoncteurs, en zone ②, avant d'arriver aux groupes motopompe. De l'autre côté, l'eau peut être dégrillée comme dans la zone ③. Elle passe

ensuite au travers des pompes en zone ④. La zone ⑤ correspond à l'équipement antibélier et/ou régulation qui est indispensable dans ce genre d'installation. La partie comptage du débit est située en zone ⑥.

3.2. DETAILS DU MONTAGE DES POMPES

L'agrandissement d'un plan d'électromécanique au niveau des pompes met en évidence les équipements hydrauliques suivants :

- à l'aspiration de la pompe : une vanne à passage intégral, un raccord major, une manchette et un cône convergent,
- au refoulement de la pompe : un clapet anti retour, un joint de démontage et une vanne papillon.

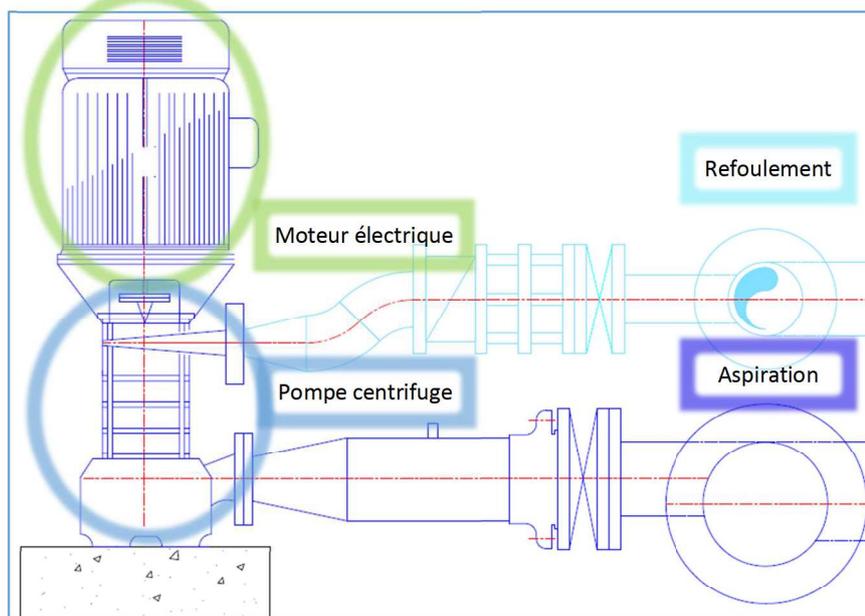


Figure 3: Agrandissement d'une vue en coupe type du montage des équipements hydrauliques à l'amont et à l'aval d'une pompe

Ces équipements hydrauliques assurent des rôles de sécurisation des pompes, de sectionnement et de démontage des pompes. La partie motrice, est accouplée à la partie hydraulique pour former ce qu'on appelle le groupe électropompe.

3.3. LES POMPES

3.3.1 TYPOLOGIE DE POMPES

On s'intéresse maintenant aux contraintes de fonctionnement liées aux pompes car c'est l'organe des stations de pompage qui est le plus soumis aux contraintes mécaniques. Elles ont de grands risques de subir des usures.

Les pompes utilisées en irrigation sont des pompes rotodynamiques, et plus spécifiquement des pompes centrifuges. Il en existe plusieurs types qui ont chacune leurs spécificités (*Snecorep guide technique 2010*) :

- Monocellulaire,
- Multicellulaire,
- Pompe à plan de joint,
- Pompe immergée,
- Pompe submersible,
- Pompe à ligne d'arbre.

De plus, elles fonctionnent très souvent en charge avec une hauteur d'eau amont suffisante pour éviter toute problématique de cavitation.



Compte tenu des HMT importantes nécessaires à l'irrigation, comme détaillé au point 3.4, les pompes utilisées sont principalement de type centrifuge multicellulaire.

3.3.2 DETERMINATION MECANIQUE DES POMPES

Le choix d'une pompe doit tenir compte des paramètres hydrauliques, mais aussi d'autres aspects relatifs à des paramètres mécaniques. En effet, le choix des matériaux est conditionné par (*Savoir Faire KSB n°1 2005, Snecorep Guide Technique 2010*) :

- ↘ la pression maximale de sortie de la pompe,
- ↘ la température du fluide véhiculé,
- ↘ l'usure et la corrosion potentielles,
- ↘ les paramètres physico-chimiques du fluide.

3.3.3 LIMITES D'UTILISATION DES POMPES :

Les pompes sont soumises à de fortes contraintes et ne peuvent pas être utilisées dans n'importe quelles conditions. Des phénomènes de bruit et de vibration peuvent être occasionnés lorsque la pompe est utilisée en deçà d'une certaine valeur de débit qui lui est propre. Une augmentation de température est possible lors des débits faibles lorsque les calories créées par la pompe ne sont pas évacuées et conservées à cause des phénomènes de recirculation dans la pompe. Ces phénomènes engendrent une usure prématurée de la pompe. Une règle assez générale conseille d'utiliser une pompe entre 70 et 120 % de sa valeur de débit de nominal. (*Xylem White Paper 2004*) Cependant ces valeurs sont très variables d'une pompe à l'autre car elles dépendent de la typologie de la machine, de ses matériaux de construction, de son utilisation etc. Il est conseillé de demander aux constructeurs les valeurs de débits minimaux et maximaux correspondant aux pompes utilisées.

Un fonctionnement à faible débit ou à débit nul est toujours une épreuve pour une pompe et souvent un danger. Elle est source :

- ↘ De recirculations,
- ↘ D'efforts périodiques très augmentés sur les aubes de la roue du diffuseur,
- ↘ D'augmentation des niveaux de vibration,
- ↘ D'instabilités dynamiques du système pompe circuit,
- ↘ D'effort radial avec flexion de l'arbre pour les pompes à volute et sans diffuseur,
- ↘ D'augmentation de l'instabilité de la ligne d'arbre,
- ↘ D'augmentation importante de la puissance absorbée sur les hélices.

Les principales conséquences de la poussée radiale sur le comportement mécanique d'une pompe sont un fléchissement de l'arbre qui réduit le jeu au niveau des sections de fuite. Le fléchissement peut conduire à un contact rotor stator, et à une flexion de l'arbre pouvant entraîner des contraintes supérieures à la limite d'endurance du matériau et finalement une rupture par fatigue, ainsi qu'une charge supplémentaire sur les paliers radiaux qui supporte le rotor. (*Poulain 1996*). Le fonctionnement des pompes est donc limité par les contraintes mécaniques vues ci-dessus qui imposent de définir des conditions d'utilisations au sein de la régulation.

La pompe n'est cependant pas la seule entité à prendre en compte dans la définition des conditions d'utilisation. Les moteurs généralement utilisés dans le secteur industriel et plus particulièrement en pompage sont de type asynchrone. Ils présentent des échauffements lorsque leur fréquence est trop basse. En effet leur vitesse de rotation est trop basse pour assurer une ventilation correcte et évacuer les calories dégagées.

Pour remédier aux problèmes les fabricants de matériel définissent des plages d'utilisation des pompes et des moteurs. Dans une optique d'optimisation, la régulation sera soumise au respect de ces différents seuils.

Les pompes, organes essentiels de la distribution de débit et de pression sur le réseau, sont soumises à de fortes contraintes de fonctionnement. Ces dernières doivent être prise en compte lors de la définition de la régulation de la station afin de proposer un asservissement optimal des pompes.

CHAPITRE 4 : LES PRINCIPES DE LA REGULATION

4.1. DEFINITION GENERALE DE LA REGULATION

La régulation est une opération qui consiste à mesurer en permanence une grandeur à réguler (par exemple le débit, la pression, un niveau d'eau, une température etc...) et à la comparer à une consigne définie par le concepteur de l'installation. Si un écart est trouvé lors de cette comparaison, une action d'augmentation ou de diminution modifiera la grandeur régulée pour corriger cet écart. (*Savoir Faire KSB n°1 2005*) Les mesures sont réalisées avec un pas de temps régulier et l'ajustement de la régulation est fait à chaque nouvelle boucle. Cela permet d'offrir une réponse continue et en temps réel.

Seront ensuite détaillés les différents modes de régulation afin de mettre en évidence celui qui nous permettra de répondre à la problématique d'optimisation énergétique.

En annexe 1, un graphique est associé à chacun des modes de régulation présenté ci-après.

4.2. REGULATION D'UNE SEULE POMPE A VITESSE FIXE

Lorsque l'on utilise une pompe seule il existe plusieurs solutions de régulation du débit qui seront plus ou moins adaptées selon l'objectif de l'installation de pompage, à savoir (*La Houille Blanche n°2 1993, Savoir Faire KSB n°1 2005*) :

- *Pas de régulation : la mise en marche des pompes est assurée manuellement par le responsable de la station ou de façon automatique.*
- *Régulation du débit par laminage : une vanne, installée à l'aval proche de la pompe, crée une perte de charge qui fait remonter le point de fonctionnement de la pompe sur la gauche de sa courbe. La pompe délivre alors un débit plus faible ainsi qu'une hauteur manométrique plus forte qui est absorbée par la vanne. Le rendement peut être fortement dégradé.*
- *Régulation du débit par by-pass : un by-pass équipé d'une vanne est installé en parallèle de la pompe. L'ouverture de la vanne permet de renvoyer une partie du débit à l'amont de la pompe et modifie le débit envoyé au réseau. La pompe travaille en permanence à proximité de son point de fonctionnement nominal, le rendement n'est pas dégradé.*
- *Régulation sur décharge : utilisation d'un volume tampon (réservoir ou ballon) dont les niveaux haut et bas correspondent à des pressions de consignes de démarrage et d'arrêt de la pompe.*

Ces modes de régulation ne permettent pas une maîtrise et une optimisation de la consommation énergétique, ils ne seront donc pas étudiés plus en détail.

4.3. REGULATION DU DEBIT PAR CASCADE DE POMPE

L'installation en parallèle de plusieurs pompes similaires est très courante et permet de mettre en place les modes de régulation suivants (*La Houille Blanche n°2 1993, Savoir Faire KSB n°1 2005, Cours ENGEES Pompage à la demande*) :

- *Régulation manométrique : le principe est similaire au cas précédent, chaque pompe se voit attribuer des seuils de pression de démarrage et d'arrêt.*
- *Régulation débitmétrique : un débitmètre est installé dans la station et commande le démarrage et l'arrêt des pompes en fonction de seuils de débit prédéfinis.*
- *Régulation mano-débitmétrique : les deux modes de régulation précédents sont associés. Les pompes petits débit seront pilotées de façon manométrique et les pompes principales seront pilotées de façon débitmétrique.*

Ces modes de régulation sont adaptés à beaucoup d'installation de pompage mais ils ne permettent pas la maîtrise et l'optimisation de l'énergie, ils ne seront donc pas étudiés plus en détail.

4.4. REGULATION DU DEBIT PAR VARIATION DE VITESSE

La régulation par variation de vitesse est possible lorsqu'une ou plusieurs pompes voient leur moteur être équipé de variateurs de fréquences. Cela implique cependant une perte d'énergie supplémentaire des groupes de pompages dus au rendement du variateur. La variation de vitesse d'une pompe permet de translater sa courbe débit / hauteur (courbe QH) et ainsi faire varier la pression. En appliquant la théorie des pompes à vitesse variable et ainsi les lois de similitude, il est possible de tracer les courbes de pompe pour différentes fréquences, comme sur le graphique ci-dessous.

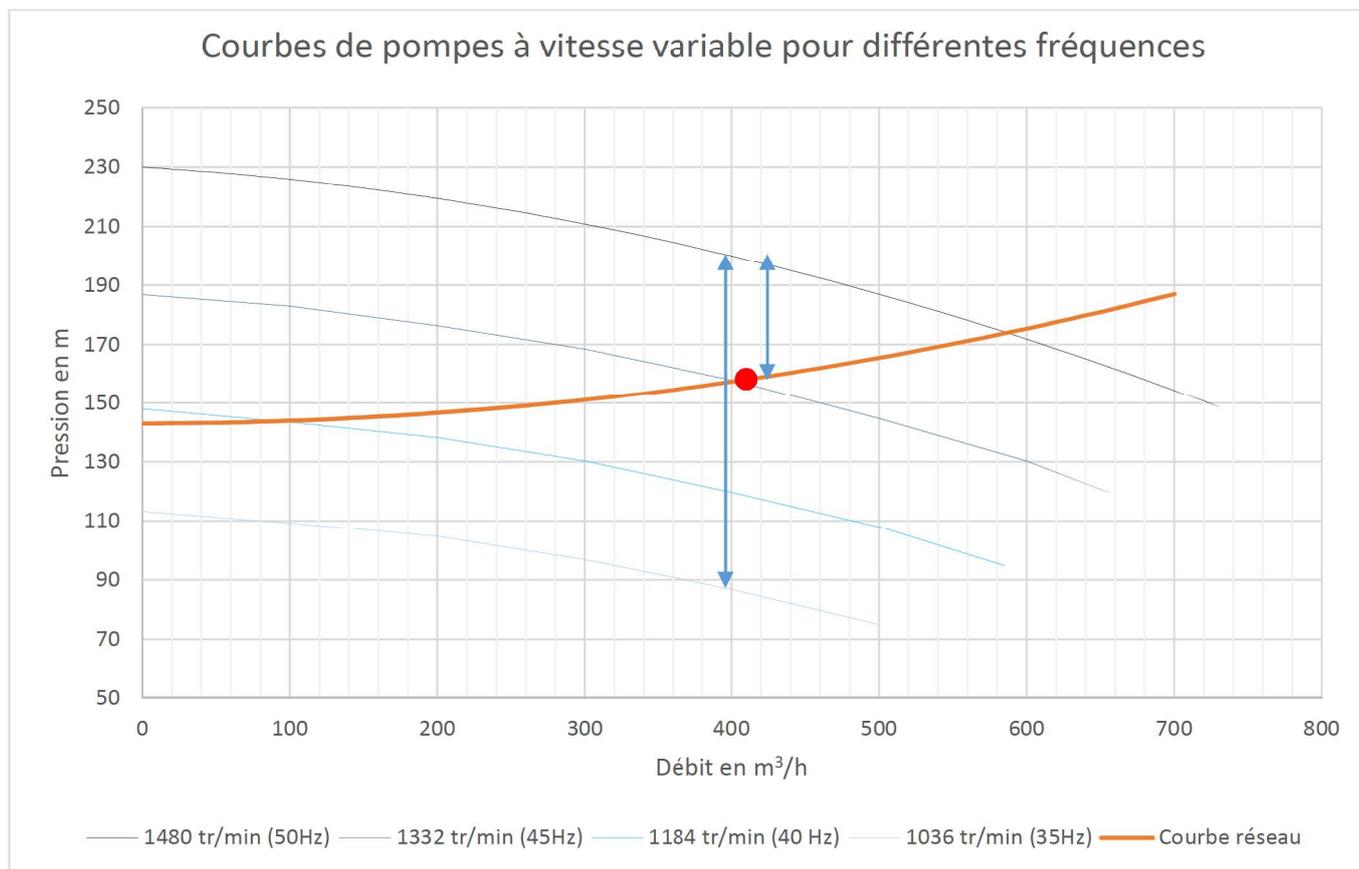


Figure 4: Fonctionnement d'une pompe à vitesse variable pour des fréquences de 35, 40, 45 et 50 Hz

L'observation du graphique permet de constater que pour un même débit appelé, la variation de vitesse permet de délivrer une pression variable. Considérons ici un débit appelé égal à 400 m³/h et une plage de variation de fréquence du moteur s'étendant de 35 à 50 Hz. La pression délivrable par la pompe est comprise approximativement entre 90 et 200 mHMT. Cependant la courbe de réseau indique qu'à ce débit la pression minimale requise sur le réseau est de l'ordre de 160 mHMT. Ainsi la vitesse de rotation de la pompe doit être au moins supérieure à 1332 tr/min (et la fréquence du moteur d'au moins 45 Hz). Par conséquent il est possible d'adapter la vitesse de la pompe et de distribuer une pression suffisante pour atteindre le point de bon fonctionnement du réseau. La pression délivrée par la pompe à vitesse variable est maîtrisée, et offre aux installations une grande flexibilité et adaptabilité.

4.5. ÉTUDE DE L'UTILISATION DE POMPES A VITESSE VARIABLE

Le graphique ci-après présente les possibilités techniques offertes par l'ajout d'un ou plusieurs variateurs de vitesse dans une installation de pompage composée de huit pompes en parallèle. Il provient de l'ouvrage (*Savoir KSB n°2 2009*) et a été adapté à la configuration de l'étude de cas présentée en partie 2. Dans cet exemple, la plage de variation de vitesse a été choisie de 50 à 30 Hz.

L'objectif est de déterminer, pour chaque débit, l'intégralité des pressions qui peuvent être atteintes dans les montages de pompes en parallèle suivants :

- Huit pompes à vitesse fixe
- Une seule pompe à vitesse variable
- Sept pompes à vitesse fixe et une pompe à vitesse variable
- Deux à huit pompes à vitesse variable

Les ensembles de points atteignables sont mis en évidence grâce aux zones de couleurs sur le graphique.

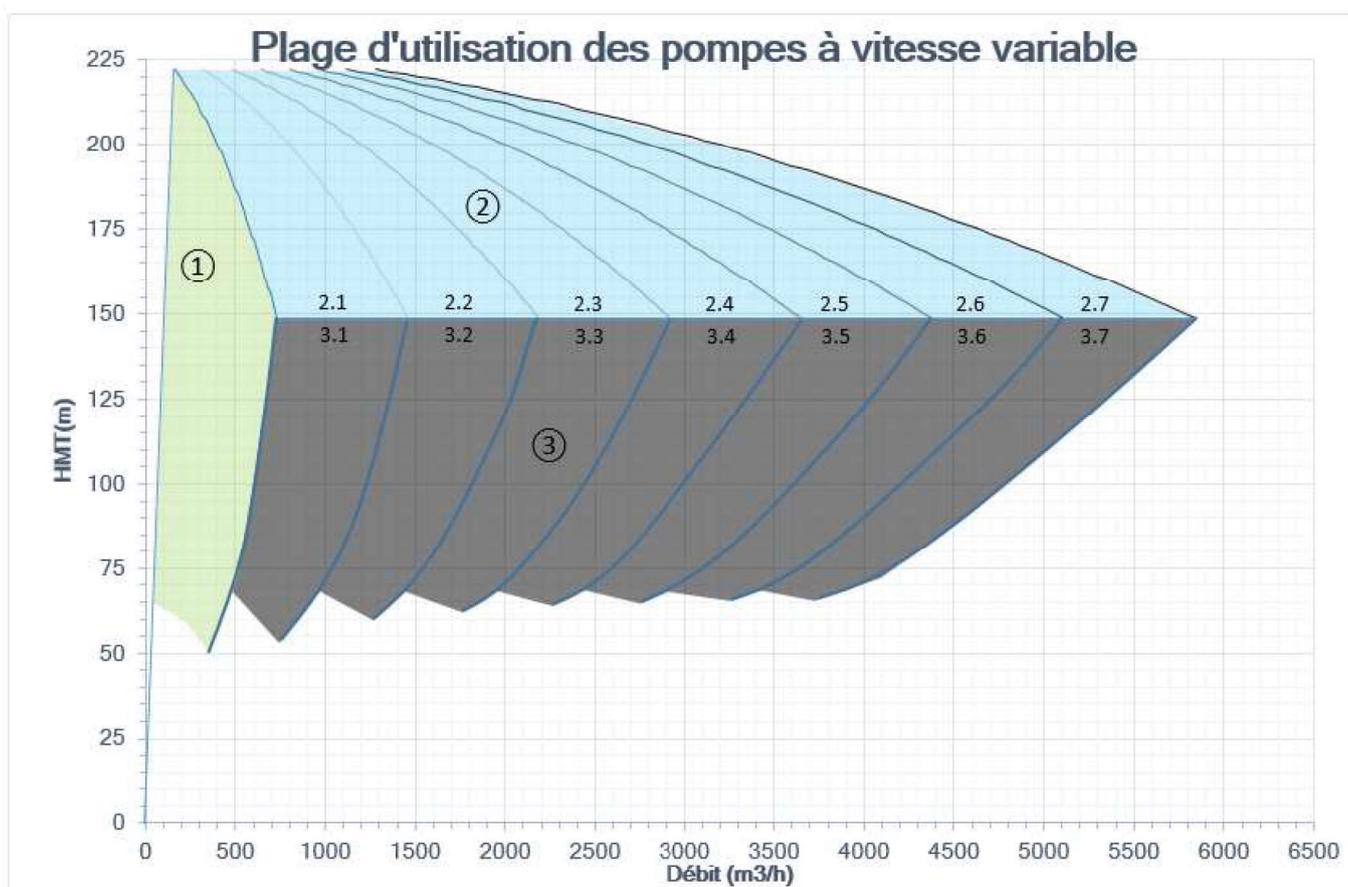


Figure 5: Extentions des plages de fonctionnement par combinaison de pompes en parallèle et pompes en vitesse variable

Considérons le fonctionnement avec huit pompes à vitesse fixe. Les pressions observables sur le réseau sont limitées par les caractéristiques des pompes, donc l'intégralité des points atteignables est située sur les différentes courbes tracées en nuances de gris sur le graphique.

Considérons maintenant l'utilisation d'une pompe à vitesse variable. Comme vu au sous-chapitre 4.4, pour chaque débit demandé par le réseau il est possible de ralentir la vitesse de rotation de la pompe afin d'abaisser la pression de refoulement. Par conséquent les pressions atteignables sont comprises dans la zone ①. Dans ce cas les pressions minimales et maximales qui peuvent être refoulées pour chaque débit sont limitées par les courbes de fonctionnement à 50 Hz et 30 Hz.



Ensuite, les pressions atteignables grâce à un montage d'une pompe à vitesse variable et une pompe à vitesse fixe en parallèle sont comprises dans la zone ① et la zone 2.1. La zone 3.1 n'en fait pas partie car lorsque la pompe à vitesse variable ne suffit plus pour répondre aux débits appelés, il est nécessaire d'activer la pompe à vitesse fixe en complément. La pompe à vitesse fixe fonctionne uniquement sur sa courbe à 50Hz, donc il n'est pas possible de translater sa courbe caractéristique comme avec la pompe à vitesse variable. C'est donc elle qui présente les plus fortes contraintes de pression minimale et qui les impose à la pompe à vitesse variable. Ainsi, il n'est pas possible de refouler une pression inférieure à 150 mHMT et ainsi descendre en deçà de la zone bleue. Ce principe peut être étendu à l'intégralité de la zone ② par l'ajout successif de pompes à vitesse fixe afin d'étendre la plage de débit de fonctionnement.

Pour atteindre les pressions situées en zone ③, il est nécessaire de se défaire de la contrainte de pression minimale imposée par les pompes à vitesse fixe. Considérons premièrement un fonctionnement avec deux pompes à vitesse variable. Il est possible d'atteindre des pressions situées en zone ①, 2.1 et 3.1. En effet, lors du ralentissement simultané des deux pompes à vitesse variable, leurs deux courbes caractéristiques sont translatées et il est alors possible de refouler des pressions inférieures à 150 mHMT. Considérons ensuite l'ajout successif de pompes à vitesse variable jusqu'à un montage de 8 Vv. Les différentes zones suivantes (3.2, 3.3...) sont successivement rendues disponibles jusqu'à ce que l'intégralité de la zone ③ le soit elle aussi.

Dans le cas de l'irrigation, l'installation de plusieurs variateurs de vitesse n'est généralement pas nécessaire. Les pressions sont assez fortes et les courbes des pompes centrifuges sont assez plongeantes pour ne pas avoir besoin de plus d'un variateur.

Les variateurs de vitesse offrent donc de nombreuses possibilités de régulation des stations de pompage. Ils sont commandés de façon très précise grâce à des automates programmables dans lesquels une consigne de pression est définie pour chaque débit appelé. Ensuite l'automate ordonnera au variateur de vitesse d'accélérer ou de décélérer la vitesse de rotation des pompes jusqu'à atteindre la valeur de consigne. Ce nouveau principe fait intervenir le concept de « courbe de régulation ».

4.5.1 COURBE DE REGULATION

« La courbe de régulation est une courbe théorique sur laquelle doit se situer le point de fonctionnement. Elle est définie par le concepteur de l'installation en fonction des besoins des utilisateurs. Elle garantit que du début à la fin de cette courbe (du débit minimum au débit nominal) la pompe fournit suffisamment de pression pour couvrir les pertes de charge dans les tuyauteries et les besoins des utilisateurs. » (Savoir Faire KSB n°2 2009)

Pour mettre en place une courbe de régulation, la station doit nécessairement être équipée d'un débitmètre et d'un capteur de pression analogique car la courbe de régulation est du type $H=f(Q)$. Dès lors, la pression en sortie de station évolue en fonction de la courbe de régulation. La courbe programmée dans l'automate peut avoir de multiples équations qui dépendent du fonctionnement souhaité du réseau, les plus courantes étant :

- ↘ $H=constante$
- ↘ $H=aQ+cst$
- ↘ $H=aQ^2+cst$

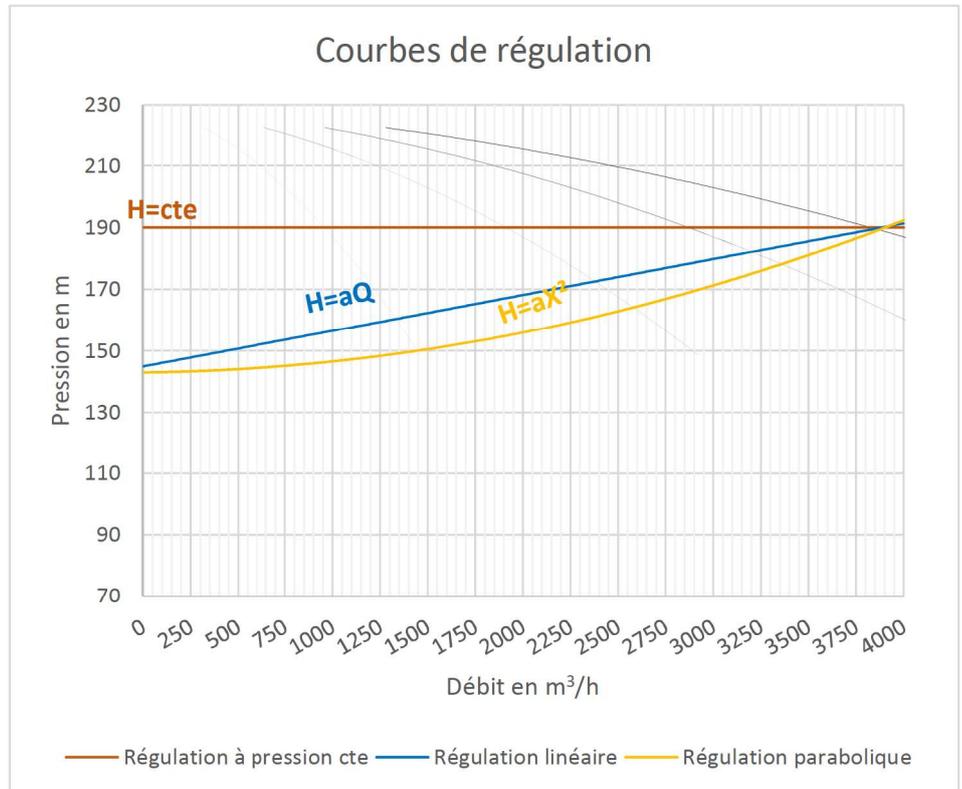


Figure 6:Présentation de diverses courbes de régulation pouvant être mise en place en variation de vitesse des pompes

4.5.2 LES AUTRES AVANTAGES

En plus de la maîtrise et de l'adaptabilité des installations de pompage, d'autres avantages sont offerts par la variation de vitesse. Les variateurs de vitesse demandent peu d'entretiens et ils permettent de limiter les sollicitations lors des phases de démarrage et d'arrêt des pompes. De plus le système de pompage ne tourne plus en permanence à sa vitesse maximale donc la durée de vie des pompes et des accessoires sont prolongés. Un autre point fort est le bruit qui diminue quand la vitesse de la pompe diminue. Les dimensions du ballon de régulation sont par ailleurs amoindries dans le cas de l'utilisation d'un variateur de vitesse. (Snecorep Guide technique 2010)

L'objectif du projet étant l'optimisation énergétique des stations de pompage à la demande, la variation de vitesse est donc la solution la plus adaptée. En effet, cette solution offre une grande adaptabilité du débit et des pressions, lorsque les autres solutions offrent simplement une régulation du débit.

La régulation des stations de pompage est synonyme de maîtrise du fonctionnement. Il existe de nombreux modes de régulation qui permettent de définir des consignes de pression à atteindre en fonction du débit. Cependant seule la régulation par variation de vitesse offre la possibilité de mettre en place une courbe de régulation, et ainsi des possibilités d'optimisation de l'énergie.





Partie II : ETUDE DE LA REGULATION DE LA STATION DE POMPAGE DE L'ASSOCIATION SYNDICALE D'IRRIGATION DE L'AIN (ASIA)

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

La présente partie porte sur l'analyse puis l'optimisation de la régulation d'une station de pompage d'irrigation, avec pour objectif la définition de règles qui seront incluses dans les cahiers des charges des futurs appels d'offre de travaux. Lors de mon apprentissage, j'ai participé à la maîtrise d'œuvre du projet de l'Association Syndicale Autorisée d'Irrigation de l'Ain (ASIA). Ce dernier consistait à la substitution de 43 pompes individuels et collectifs actuellement réalisés dans la nappe d'accompagnement de l'Ain. En effet, la SAGE de la basse vallée de l'Ain a mis en évidence le fait que la rivière souffre d'une élévation de température en période d'étiage. Afin de favoriser la vie piscicole, le SAGE préconisait une limitation des autorisations de prélèvements à hauteur de 30 à 50% des volumes prélevés en 2003. Pour aller dans le sens de ces préconisations, l'ASIA a décidé de sécuriser l'accès à l'eau pour les exploitations agricoles tout en préservant la nappe d'accompagnement de l'Ain. Ainsi le projet de création d'un nouveau réseau collectif d'irrigation a vu le jour. Il se compose de la création d'une station de pompage d'eau brute dans le Rhône (3800 m³/h à 190 mHMT) et à la pose un réseau de canalisation d'un linéaire de 40 km.

Cette affaire a été naturellement choisie pour étayer le TFE compte tenu de :

- *Ma connaissance de cette dernière,*
- *La disponibilité des données de débit et de pression enregistrées lors de la saison d'irrigation 2018,*
- *La disponibilité des Dossiers d'Ouvrage Exécutés (DOE),*
- *La régulation par vitesse variable de la station qui permet une analyse poussée du potentiel d'économie énergétique.*

1.1.1 IMPLICATION PERSONNELLE

Au commencement du travail de fin d'études, les données disponibles pour le réaliser sont les suivantes :

- *L'étude en phase PRO de l'affaire de l'ASIA réalisée par le cabinet CA EAU*
- *La modélisation hydraulique du réseau réalisée par un cotraitant lors de la phase PRO*
- *Les DOE réalisés par l'entreprise adjudicatrice des travaux relatifs au lot électromécanique*

Je n'ai pas participé aux études ci-dessus, cependant afin de mener à bien mon travail de fin d'études j'ai réalisé en autonomie :

- *L'analyse approfondie de la problématique*
- *L'analyse de la régulation qui a été mise en place lors des travaux*
- *Un Excel qui calcule la consommation énergétique d'une installation de pompage en fonction de l'évolution des débits au cours d'une saison d'irrigation, ainsi que la variation des rendements liée aux pressions attendues et à la variation de vitesse des pompes en faisant intervenir un codage VBA.*
- *La proposition de solutions d'optimisation ainsi que la détermination des règles composant le cahier des charges de régulation.*

CHAPITRE 2 : COURBE DE RESEAU

Lors de l'étude en phase projet de l'affaire de l'ASIA, la courbe de réseau prise en compte a été définie afin d'assurer de bonnes conditions de débit et de pression en tout point du réseau. Le maître d'ouvrage souhaitait que la quasi-totalité des bornes du réseau puissent être ouvertes simultanément et que la pression résiduelle en sortie des bornes soit au moins égale à 10 bars. Une modélisation hydraulique du réseau a été réalisée en tenant compte de ces critères afin de déterminer le nœud présentant les conditions de pression les plus défavorables et ainsi déterminer le point nominal de fonctionnement de la station. Le résultat de la modélisation hydraulique donne la borne B127 comme celle présentant les pressions les plus défavorables.

2.1. DETERMINATION DE LA COURBE RESEAU

Le modèle hydraulique est ensuite utilisé afin de construire la courbe de réseau à la borne B127 visible sur le plan en annexe 2. La pression à cette borne est calculée avec différentes demandes de débit (0, 2000 et 4000 m³/h). Une régression linéaire à l'ordre deux permet de déterminer l'équation de la courbe de réseau suivante :

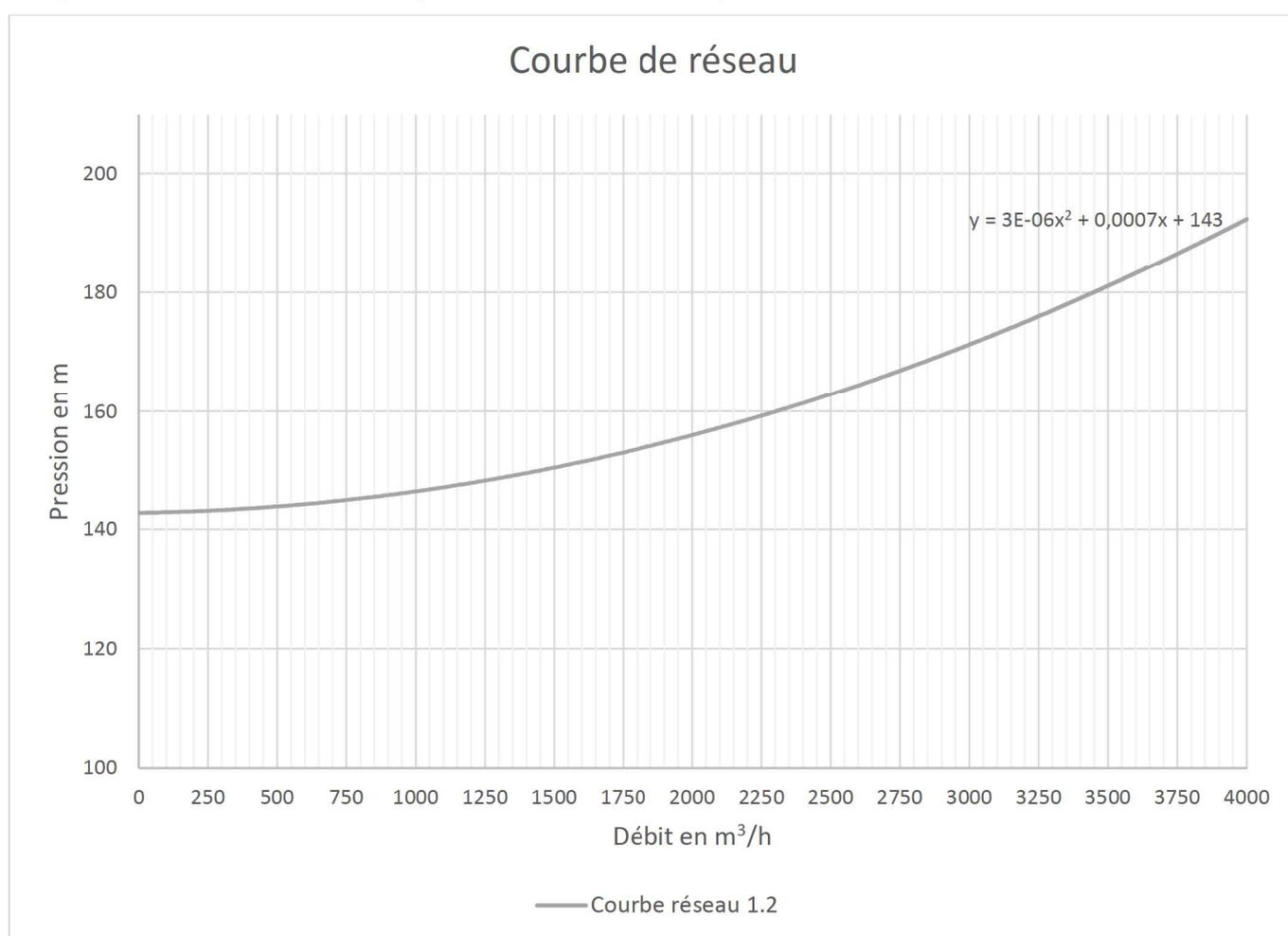


Figure 7: Courbe de réseau au point le plus défavorable du réseau de l'ASIA

La courbe de réseau au point le plus défavorable du réseau (borne B127) est dorénavant connue. Ainsi pour chaque débit, si la pression observée à la borne B127 se situe au-dessus de la courbe réseau, alors chaque borne du réseau présentera une pression résiduelle supérieure à 10 bars. Pour la suite de cette étude la courbe réseau est considérée comme réelle, et l'objectif de la régulation sera de fournir des pressions sur le réseau a minima égales à cette courbe.

2.2. ANALYSE DES HYPOTHESES DU MODELE HYDRAULIQUE

2.2.1 DETAIL DES HYPOTHESES D'ENTREES

Le calcul du point de fonctionnement de l'installation est détaillé ci-dessous afin de mettre en évidence les hypothèses prises en compte dans le modèle.

La HMT de la station est calculée au débit de 3900 m³/h et est déterminée comme suit : $HMT = Hg + PdCl + PdCs + PdCi + Pr$

- ↘ Hauteur géométrique entre la bête de la station et la borne B127 : $Hg = 234 - 201 = 33m$
- ↘ Pertes de charges linéaires (coefficient de rugosité $k=0.1 mm$) : $PdCl = 43m$
- ↘ Pertes de charge singulières dans le réseau de canalisations (considérée égale à 10% des PdCl) : $PdCs = 4.3m$
- ↘ Pertes de charge internes aux bornes : $PdCi = 10m$
- ↘ Pression résiduelle souhaitée : $Pr = 100m$
- ↘ Pression de refoulement des groupes de pompage : $HMT = 190m$

Le point nominal de fonctionnement de la station a donc été fixé à un débit de 3900 m³/h à 190mHMT.

2.2.2 LIMITE DE LA METHODE

Cette méthode de détermination de la courbe réseau (ou du point de fonctionnement) a cependant tendance à surestimer les pertes de charge. En effet, considérer les pertes de charge singulières égales au dixième des pertes de charge linéaires est une hypothèse simplificatrice par surévaluation. Ce coefficient est censé être légèrement surévalué face aux pertes de charge singulières réelles. Cela permet de dimensionner les installations selon une configuration plus défavorable, et ainsi assurer des conditions de pression toujours adéquates.

Il en est de même avec le choix du coefficient de rugosité $k = 0.1 mm$.

2.2.3 PERTINENCE DU CHOIX DU COEFFICIENT DE RUGOSITE

Les pertes de charge correspondent à l'énergie qu'il faut fournir pour que l'eau circule dans la canalisation. Elles sont constituées de 3 termes :

- ↘ Le frottement de l'eau sur elle-même, lié à sa viscosité,
- ↘ Le frottement de l'eau sur la paroi du tuyau, lié à la rugosité,
- ↘ Les modifications locales de l'écoulement, liées aux équipements hydrauliques tels les coudes, tés ... [...]

« Une série d'essais ont été réalisés pour évaluer la valeur de k de la rugosité de surface des tuyaux fraîchement revêtus intérieurement de ciment ; une valeur moyenne de $k=0.03$ a été trouvée [...]. Toutefois, la rugosité de surface équivalente d'une canalisation ne dépend pas seulement de la régularité de la paroi du tuyau, mais également et surtout du nombre de coudes, de tés et de branchement, ainsi que des irrégularités du profil de la canalisation. L'expérience a montré que $k=0.1 mm$ est une valeur raisonnable. Dans le cas de grandes conduites comportant un faible nombre de raccords par kilomètre, k peut être légèrement inférieur (0.06 à 0.08 mm). » (Guide de conception PAM 2018)

Cette méthode de dimensionnement surestime les pertes de charge dans le réseau et donc la HMT des pompes de la station. Il en découle une surconsommation d'énergie qui est inutile. Cependant elle est très adaptée à une étude en phase de projet de réseau d'irrigation sous pression. En effet le dimensionnement des pompes doit obligatoirement proposer une HMT supérieure à la HMT réelle qui sera observée lors de l'utilisation de la station. Il faut garantir que les caractéristiques des pompes soient suffisantes pour assurer de bonnes pressions résiduelles aux bornes du réseau et pour ne pas prendre de risque. Ce dimensionnement se veut et doit être sécuritaire. Du point de vue de l'utilisation et des utilisateurs, cela ne pose pas de problème car un surplus d'un bar de pression est généralement transparent voire bienvenu. A l'inverse un déficit d'un bar peut engendrer des complications compte tenu des besoins de pression des équipements d'irrigation branchés à l'aval des bornes.



La méthode de détermination de la HMT des pompes est considérée comme ayant fait ses preuves au sein du cabinet et son optimisation n'est donc pas étudiée dans ce rapport. Les caractéristiques de la courbe réseau et la HMT des pompes sont à présent connues. Le débit et la HMT en sortie de station sont les deux données qui ont permis de déterminer le découpage et les caractéristiques des pompes dans la station.

L'état des lieux de la station de l'ASIA débute par la détermination de la courbe de réseau. Cette étape est impérative avant de choisir une courbe de régulation. En effet elle correspond aux pressions minimales à distribuer au réseau.

CHAPITRE 3 : LA STATION ET LES POMPES

3.1. DECOUPAGE DES GROUPES DE POMPAGE PRINCIPAUX



Figure 8: Photographie des groupes électropompes et des équipements hydrauliques qui composent la station de l'ASIA

Lors des travaux de création de la station de pompage, les pompes suivantes ont été installées :

- 9 groupes principaux de $490 \text{ m}^3/\text{h}$ à 190 mHMT montés en parallèle (dont 2 fonctionnant en alternance et équipés de variateur de vitesse). Leur vitesse nominale est de 1480 tr/min . Le débit minimal vaut $150 \text{ m}^3/\text{h}$ et le débit maximal vaut $700 \text{ m}^3/\text{h}$. La fiche technique est disponible en annexe 3.
- 2 groupes « jockey » (dont un de secours) de $110 \text{ m}^3/\text{h}$ à 190 mHMT . L'objectif de cette pompe est d'assurer la fourniture des débits les plus faibles. Les pompes principales ne peuvent pas fournir ces débits car elles fonctionneraient trop sur la gauche de leur courbe. Leur vitesse nominale est de 1480 tr/min
- 1 groupe « petits débits » de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ à 175 mHMT . L'objectif de cette pompe est de garder le réseau en pression en remplissant le réservoir de régulation lorsque aucune borne n'est ouverte et que seules les fuites créent du débit. La vitesse nominale est de 3000 tr/min .

Le nombre de pompes principales est aussi important car le maître d'ouvrage a demandé que l'installation reste en basse tension car les équipements sont plus faciles à fournir et les moteurs sont réparables plus facilement. En effet la puissance est limitée à 400 kW en basse tension. La puissance nominale des pompes installées est de 323 kW .

Le capteur de pression se situe sur le réservoir antibélier et le débitmètre se trouve sur la canalisation générale de refoulement. Pour situer ces équipements, se reporter au plan de station présenté en Partie I :3.1 qui correspond au plan de projet de l'ASIA.

3.2. CONSTRUCTION DU GRAPHIQUE DES DIFFERENTES COURBES DE POMPE

Les fiches techniques de ces pompes sont en annexes. Les courbes des huit pompes principales en parallèle ont été reportées sur le graphique suivant, en complément de la courbe réseau. Les courbes des pompes « petits débits » et « jockey » ne sont pas représentées car ces dernières sont très peu sollicitées. Les courbes de la pompe à vitesse variable sont ensuite représentées pour les fréquences de 50, 45, 40 et 35 Hz.

Sont tracées sur le graphique ci-dessous :

- ↘ Les courbes de la pompe à vitesse variable (Vv) en nuances de bleu,
- ↘ Les courbes des pompes à vitesse fixe (Vf) en parallèle en nuances de gris,
- ↘ La courbe de réseau (en vert).

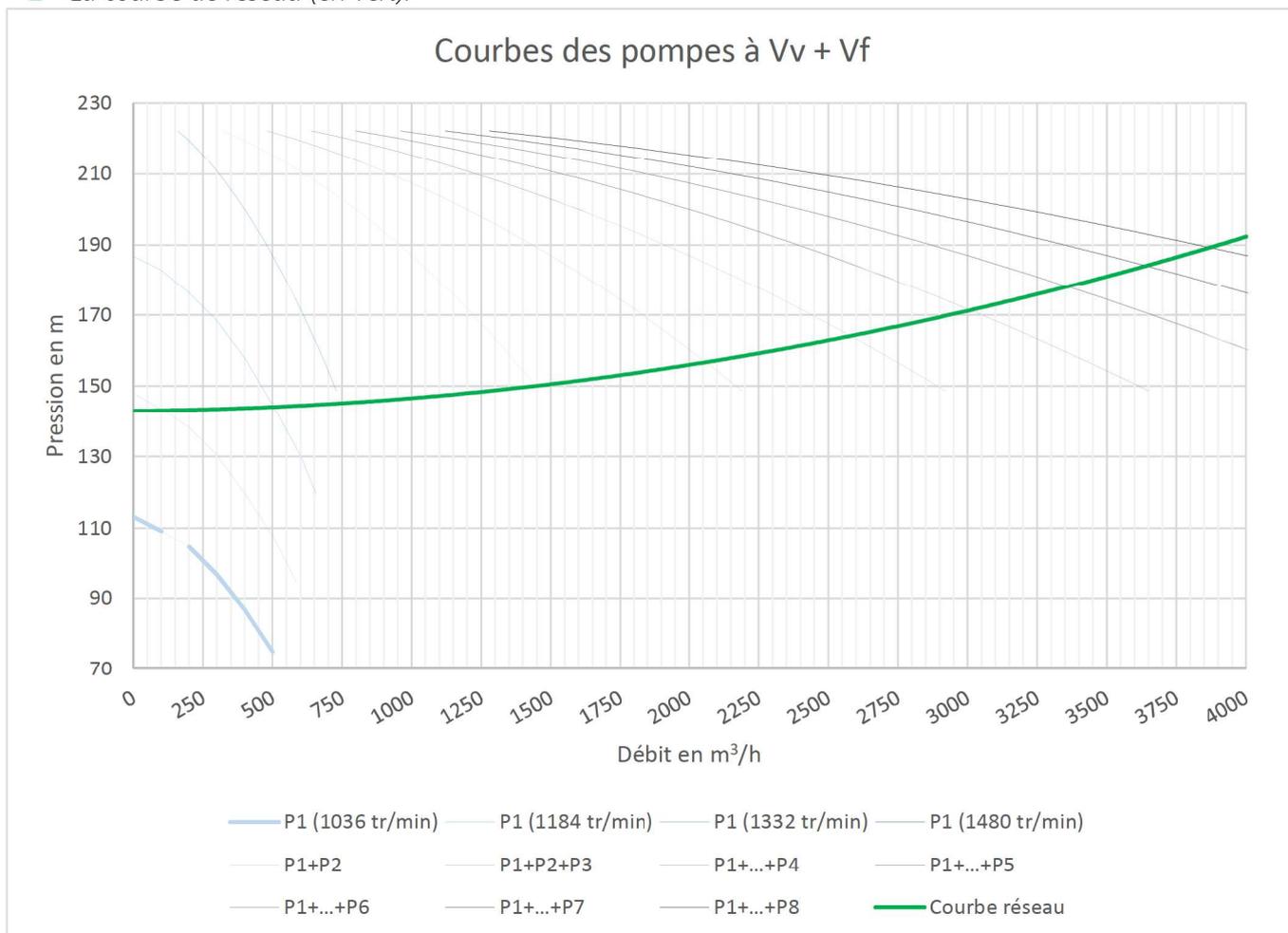


Figure 9: Courbes caractéristiques de huit pompes montées en parallèle dont une à vitesse variable

CHAPITRE 4 : ANALYSE TECHNIQUE DE LA REGULATION MISE EN PLACE

Lors des travaux d'électromécanique, une courbe de régulation a été mise en place. Son analyse permet de mettre en évidence des défauts dans sa conception et faire émerger des pistes d'amélioration.

4.1. ANALYSE DE LA COURBE DE REGULATION MISE EN ŒUVRE DANS LE CADRE DES TRAVAUX

La courbe de régulation qui a été saisie dans l'automate est la suivante :

- Sur la plage de débit $0 < x < 2500$, son ordonnée à l'origine vaut $y=160$ mHMT, elle augmente ensuite de façon linéaire jusqu'à atteindre le point de coordonnées $(X=2500 ; Y=195)$. Sur cette plage de valeur sa forme mathématique est $P(x) = \frac{35}{2500} x + 160$
- Sur la plage de débit $2500 < x < 3900$, la régulation est maintenue constante à 195 mHMT

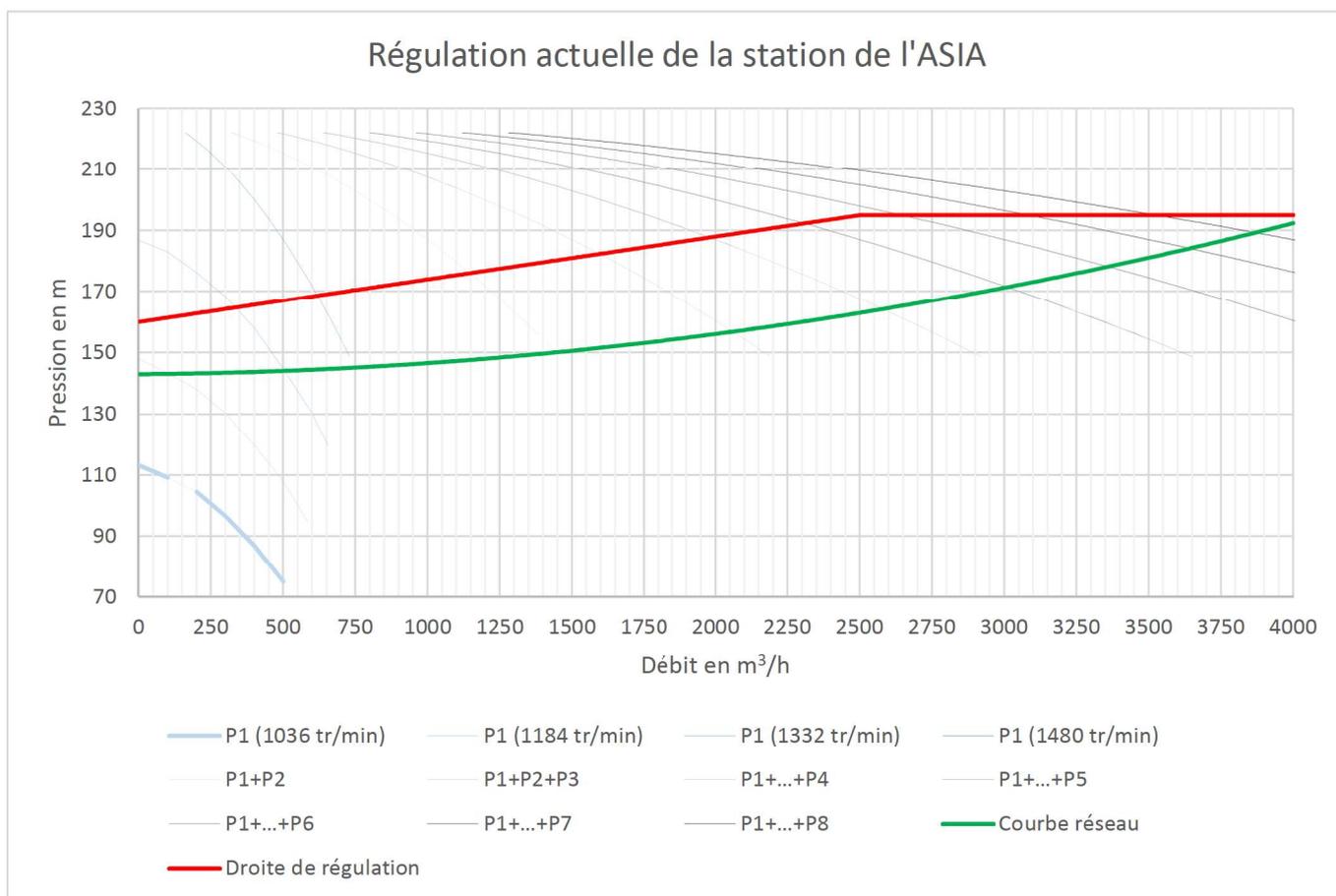


Figure 10: Courbe de régulation utilisée actuellement dans la station de pompage de l'ASIA (Ain)

Cette régulation a été définie de façon à conserver une marge de sécurité de 5 mCE au-dessus du point de fonctionnement (soit 195m à 3800 m³/h). Cette valeur était vouée à être modifiée, abaissée et calée à l'issue des essais de fonctionnement préalable à la réception des travaux. Cependant, un problème de planning n'a pas permis de tester la station à pleine charge et de corriger la régulation. Elle est donc restée inchangée sur la saison 2018.

4.2. ANALYSE DES SEUILS DE MARCHE MIS EN ŒUVRE DANS LE CADRE DES TRAVAUX

Pour que la régulation soit fonctionnelle, il est nécessaire de définir les seuils d'enclenchement et de déclenchement des pompes.

4.2.1 SEUILS D'ENCLENCHEMENT

Lors de la mise en service de l'installation, les seuils d'enclenchement et de déclenchement ont été définis par l'entreprise de travaux électromécaniques. Pour chaque seuil est associé un ordre de marche et d'arrêt des pompes. Nous parlerons donc des « ordres de marche » comme présentés en première colonne du tableau.

Ces seuils se sont révélés non opérationnels vis-à-vis du fonctionnement des pompes. Ils ont été modifiés comme dans le tableau ci-contre :

Un graphique de régulation a été émis par l'entreprise d'électromécanique lors de la restitution des DOE. Afin de s'assurer de la pertinence de ces seuils, un extrait du graphique de régulation est présenté et analysé en page suivante.

Le graphique complet est disponible en annexe 4.

Tableau 1: Ordres de marche des pompes de la station de l'ASIA (Ain)

	Seuils d'essais (m3/h)	Seuils de débit saison 2018(m3/h)
Seuil débit mini jockey	50	50
Arrêt Ordre 1	105	110
Marche Ordre 1 (VV)	130	160
Arrêt Ordre 2	590	600
Marche Ordre 2 (VV+1VF)	610	650
Arrêt Ordre 3	1060	1140
Marche Ordre 3 (VV+2VF)	1090	1200
Arrêt Ordre 4	1560	1500
Marche Ordre 4 (VV+3VF)	1600	1600
Arrêt Ordre 5	2000	2000
Marche Ordre 5 (VV+4VF)	2100	2100
Arrêt Ordre 6	2500	2500
Marche Ordre 6 (VV+5VF)	2600	2600
Arrêt Ordre 7	3000	3000
Marche Ordre 7 (VV+6VF)	3100	3100
Arrêt Ordre 8	3500	3500
Marche Ordre 8 (VV+7VF)	3600	3600
Arrêt Ordre 9	4000	4000
Marche Ordre 9 (futur) (VV+8VF)	4100	4100

4.2.3 AGRANDISSEMENT DES SEUILS DE REGULATION ANORMAUX :



Figure 12: Extrait du graphique de régulation mis en place dans le cadre des travaux de création de la station de pompage d'irrigation de l'ASIA (AIN). Provient des DOE.

Pour remédier à ces problèmes, plusieurs possibilités sont envisageables :

- Rehausser ou redresser la courbe de régulation. A noter que cela implique un fonctionnement à des pressions inutilement plus élevées,
- Décaler les seuils d'enclenchement et de déclenchement à droite de la courbe de régulation. Attention cependant à ne pas dépasser les valeurs de débits minimaux et maximaux,
- L'ajout de variateurs de vitesse sur les autres pompes peut permettre le travail de trois pompes en parallèle au même débit.

Les seuils d'enclenchement présentent des anomalies de conception. Le seuil d'enclenchement de la troisième pompe est à 1090 m³/h. Il est situé à gauche de l'intersection de la courbe de régulation et de la courbe des deux pompes en parallèle à 1115 m³/h.

Si le débit demandé est compris entre 1090 et 1115 m³/h, trois pompes sont activées. Cependant, moins de deux pompes sont nécessaires pour assurer ce fonctionnement (zone ①). Les pompes à vitesse fixe vont donc délivrer un débit non modulable égal au débit demandé, et la pompe à vitesse variable va donc ralentir jusqu'à un débit nul. Par conséquent elle est en fonctionnement, s'échauffe et ne peut pas évacuer cette chaleur au travers du flux d'eau. Cela entraîne du barbotage, une usure rapide de la pompe et sa rupture potentielle. A cet instant, le point de fonctionnement se trouve sur la courbe de deux pompes en parallèle. Pour aller plus loin et atteindre la courbe de régulation il faudrait que la pompe à vitesse variable tourne à l'envers pour que la pression descende en deçà de la courbe de pompe.

Ensuite, la plage de débit légèrement supérieure au seuil de débit de fonctionnement des trois pompes, (zone ②), présente aussi un fonctionnement dégradé de la pompe à vitesse variable. Cette dernière voit son débit être supérieur à zéro mais toujours assez faible, et inférieur au débit minimal d'utilisation préconisé par le constructeur. Les conséquences sont les mêmes que dans le cas détaillé précédemment.

4.3. GRAPHIQUE DE REGULATION AVEC LES SEUILS CORRIGES

Ces seuils ont été corrigés au début du mois de mai 2019. Ils ont été corrigés comme indiqué dans le tableau ci-contre :

Tableau 2: Ordres de marche corrigés des pompes de la station de l'ASIA (Ain)

	Seuils d'essais (m3/h)	Seuils de débit saison 2018(m3/h)	Seuils de débit corrigés (m3/h)
Seuil débit mini jockey	50	50	50
Arrêt Ordre 1	105	110	110
Marche Ordre 1 (VV)	130	160	150
Arrêt Ordre 2	590	600	625
Marche Ordre 2 (VV+1VF)	610	650	660
Arrêt Ordre 3	1060	1140	1175
Marche Ordre 3 (VV+2VF)	1090	1200	1250
Arrêt Ordre 4	1560	1500	1675
Marche Ordre 4 (VV+3VF)	1600	1600	1725
Arrêt Ordre 5	2000	2000	2100
Marche Ordre 5 (VV+4VF)	2100	2100	2150
Arrêt Ordre 6	2500	2500	2500
Marche Ordre 6 (VV+5VF)	2600	2600	2600
Arrêt Ordre 7	3000	3000	3000
Marche Ordre 7 (VV+6VF)	3100	3100	3100
Arrêt Ordre 8	3500	3500	3500
Marche Ordre 8 (VV+7VF)	3600	3600	3600
Arrêt Ordre 9	4000	4000	4000
Marche Ordre 9 (futur) (VV+8VF)	4100	4100	4100

A la suite d'un échange téléphonique avec l'entreprise qui avait réalisé les travaux d'électromécanique, un nouveau graphique de régulation corrigé nous a été transmis :

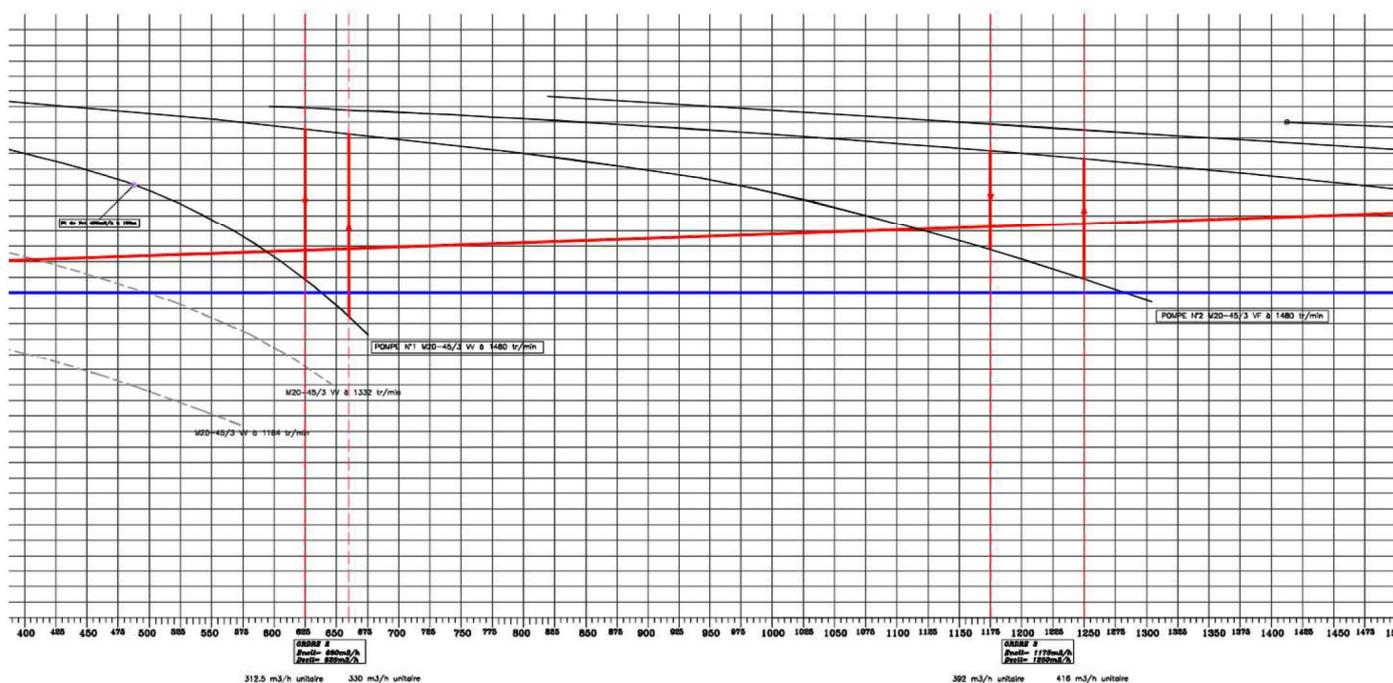


Figure 13: Extrait du graphique de régulation corrigé mis en place dans la station de pompage de l'ASIA (Ain)

La correction des seuils de fonctionnement a permis de remédier aux problèmes soulevés dans le chapitre précédent et permet d'ores et déjà d'inclure dans le cahier des charges la règle suivante :

- Les seuils d'enclenchement ne doivent pas être à gauche/ en dessus de la courbe de régulation.

Ces défauts de paramétrage ont été observés à plusieurs reprises lors de différentes affaires suivies par le cabinet CA EAU. Par conséquent l'établissement de règles assurant le bon fonctionnement et l'optimisation des futures stations apparaît comme indispensable. L'analyse approfondie de la régulation de la station est donc nécessaire.

La courbe de régulation mise en place lors des travaux présente des défauts de paramétrage. Les groupes électropompes sont la clé de voûte de l'optimisation de la régulation.

CHAPITRE 5 : ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA STATION EN PLEINE SAISON D'IRRIGATION 2018

Les informations de débit et hauteur m'ont été transmises pour la période de juin, juillet et août 2018 et ont été enregistrées toutes les minutes. L'analyse de ces données permet de comprendre le fonctionnement réel du réseau ainsi que les conséquences de la mise en place d'une régulation par variation de vitesse.

5.1. HISTOGRAMME DES SOLLICITATIONS

L'installation fonctionnant « à la demande », le débit appelé varie de 0 à 100% du débit nominal. Pour répondre à cette variation de demande, les pompes s'activent les unes à la suite des autres, en pouvant atteindre un totale de huit activées simultanément. En connaissant les ordres de marche des pompes il est ensuite possible d'attribuer chaque débit appelé à une plage de fonctionnement, et donc de déterminer le nombre de pompes activées.

Par conséquent, l'histogramme ci-dessous présente le pourcentage de temps pendant lequel chaque assemblage de pompes est sollicité

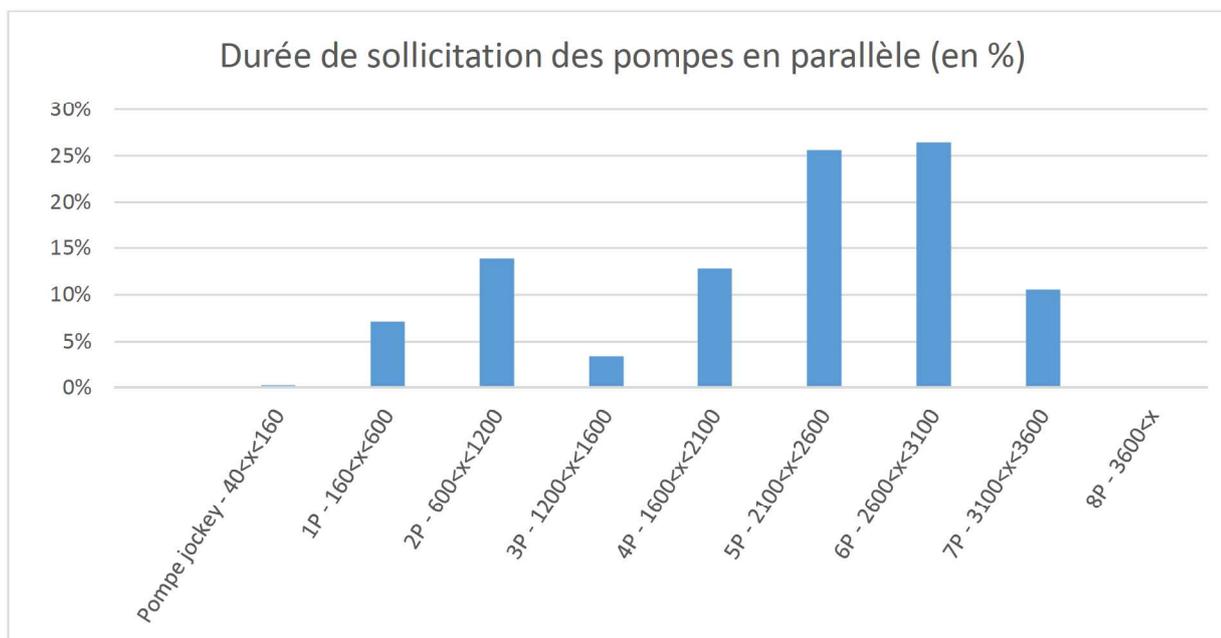


Figure 14: Répartition des durées de sollicitation des pompes de la station d'irrigation de l'ASIA (Ain)

On remarque qu'approximativement 45% du temps, les débits sont compris entre 2100 et 3100 m³/h, soit un fonctionnement de 5 et 6 pompes en parallèle. Les débits forts représentent la majorité des demandes.

De plus on remarque que la pompe jockey n'est utilisée que 0.2% du temps. Sa présence en parallèle de la pompe « petits débits » n'est donc pas forcément pertinente pendant la haute saison d'irrigation. Mais compte tenu de l'absence de données sur le reste de l'année, le propos précédent n'est pas confirmé les mois suivants.

5.2. PROFILS DEBIT ET HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS

Les profils du débit et de la pression en fonction du temps ne donnent que peu d'informations qui concernent directement la régulation, cependant d'autres phénomènes sont observables et ont suscité mon intérêt.

5.2.1 PROFIL DE CONSOMMATION

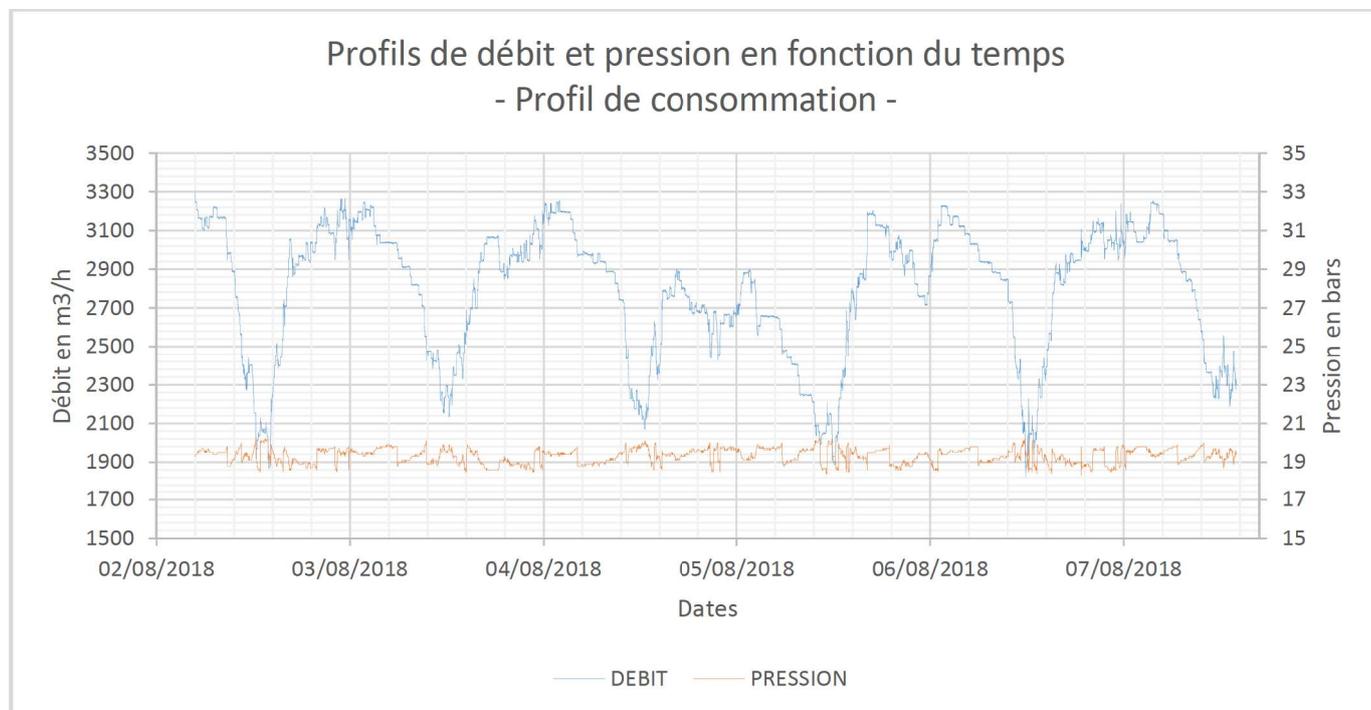


Figure 15: Profil temporel des débits et des pressions distribués par la station de pompage d'irrigation de l'ASIA (Ain)

Le profil ci-dessus montre l'évolution de la demande en eau, dont le profil de consommation se répète de façon plutôt similaire d'un jour à l'autre. Les augmentations de débit sont très rapides et viennent étayer la nécessité de réaliser du pompage à la demande, et qui plus est avec des systèmes de variation de vitesse afin d'avoir une bonne maîtrise des pressions.

5.2.2 POMPE DE MAINTIEN DE PRESSION

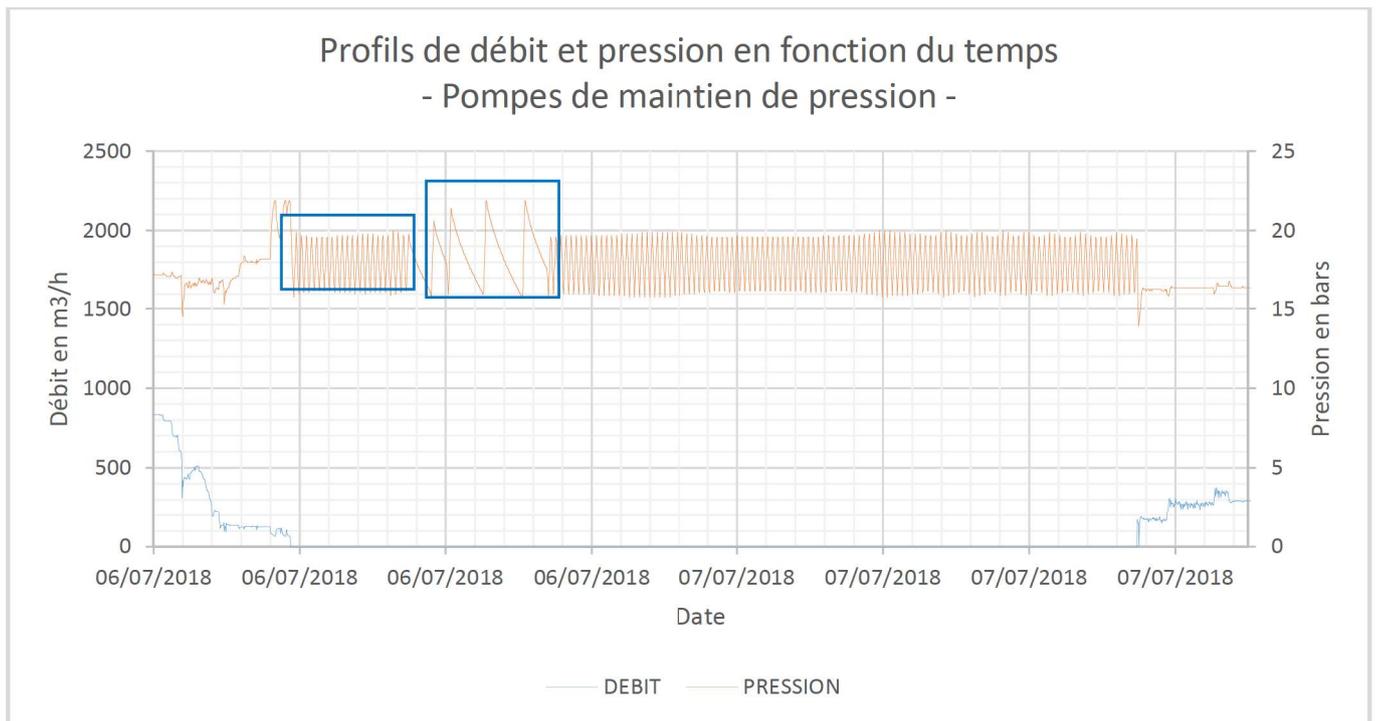


Figure 16: Evolution des pressions dans le réseau d'irrigation de l'ASIA (Ain) à débit nul ou très faible

Lors de certaines périodes, le débit appelé est égal à zéro ou est assez faible pour ne pas être détecté par le débitmètre (fiche technique en annexe 5). On observe alors des enclenchements et déclenchements successifs de la pompe petits débits dans l'objectif de venir remplir le réservoir de régulation et garder le réseau en pression.

5.2.3 EVOLUTION DE LA PRESSION AVEC ET SANS VARIATEUR DE VITESSE

Le graphique page suivante représente les évolutions de demande de débit qui apparaissent après les précipitations du 19 puis du 28 juillet 2018. Deux profils de consommation apparaissent : une baisse puis une stabilisation à hauteur de 500 m³/h, il s'ensuit une augmentation à 1000 m³/h (seuil atteint pendant la nuit) puis dans le courant du jour suivant, s'ensuit une augmentation forte et rapide jusqu'à 3000/3500 m³/h. Il y a cependant une incohérence, les profils de débit sont similaires, mais les profils de pression n'ont rien en commun. Ce phénomène s'explique par la destruction du variateur de vitesse de secours (le premier étant déjà en panne) le 25 juillet. La cause de la destruction des variateurs est incertaine à ce jour, mais pourrait être liée à une mauvaise ventilation des armoires électriques. Après cette date le fonctionnement de la station comprenait uniquement des pompes à vitesse fixe.

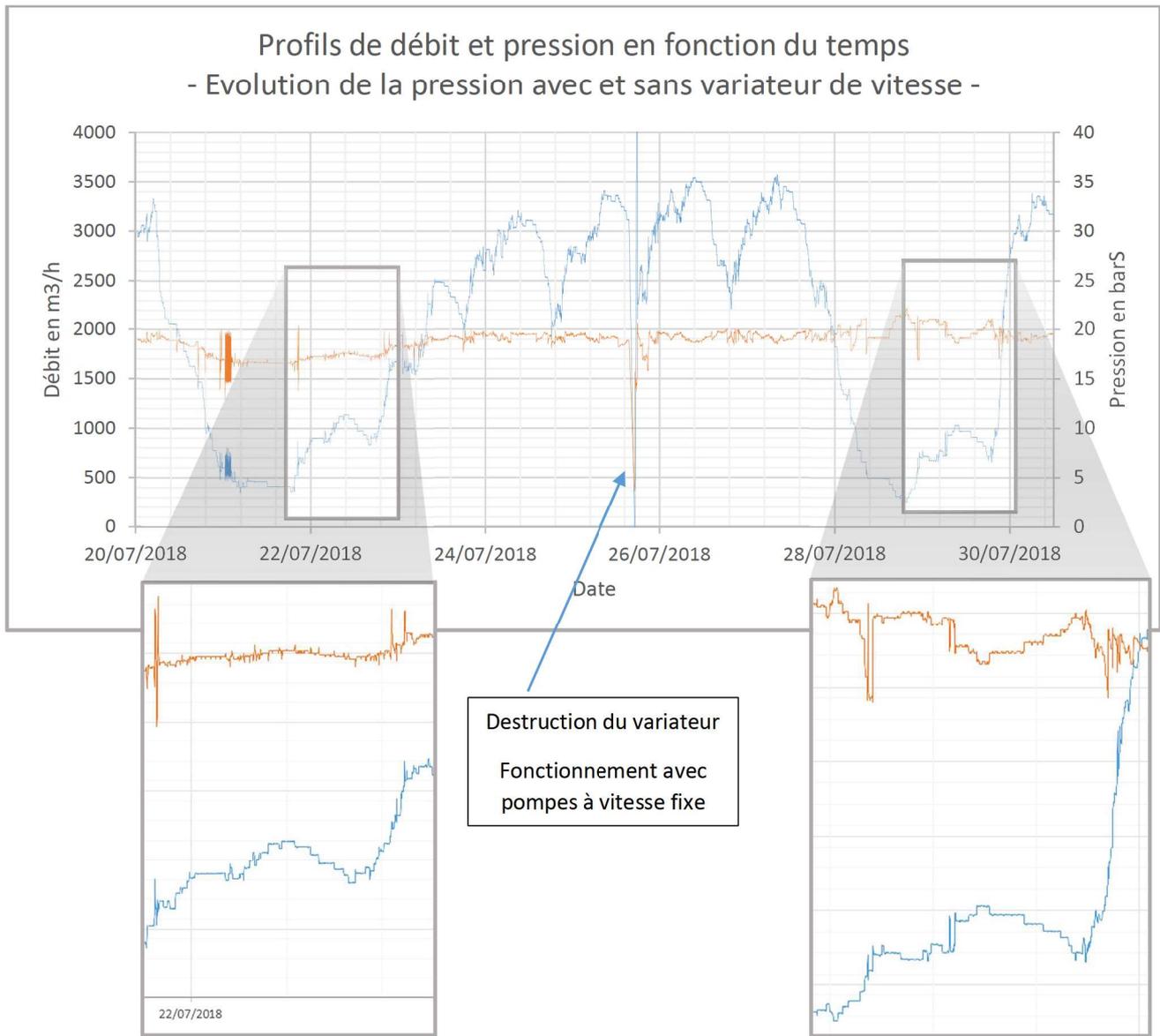


Figure 17: Impact sur les pressions distribuées de la destruction des variateurs de vitesse de la station de pompage d'irrigation de l'ASIA (Ain)

Fonctionnement avec variateur de vitesse

Lorsque le débit augmente ou diminue, le profil de pression évolue de la même façon. Le principe est cohérent : plus le débit augmente, plus les pertes de charge augmentent, donc plus la pression doit augmenter pour assurer des conditions de pression suffisantes aux bornes.

C'est la raison de ce rapport, mettre en place un système de régulation des pompes qui permet de répondre à la problématique ci-dessus tout en étant le plus optimisé possible du point de vue énergétique.

Fonctionnement avec pompes à vitesse fixe

Lorsque le débit augmente, la pression diminue. Cela est typique d'un travail des pompes à vitesse fixe. Plus le débit augmente, plus les pompes travaillent sur la droite de leur courbe, et plus la pression diminue.

Remarquons aussi que dans le cas du fonctionnement avec variateur, la pression oscille entre 17 et 18 bars, alors que dans le cas ci-dessus, la pression oscille entre 19 et 21 bars. Il y a donc des pressions résiduelles aux bornes qui sont bien supérieures aux pressions attendues. Par conséquent la consommation énergétique n'est pas optimisée

5.3. LES CONSEQUENCES DE LA REGULATION SUR LES PRESSIONS DISTRIBUEES

Du point de vue théorique, la régulation permet d'asservir de façon maîtrisée la station de pompage. Les pressions refoulées sont censées correspondre parfaitement à la courbe de régulation, sauf en considérant certains écarts potentiels provenant de l'incertitude des appareils de mesure.

En réalité la courbe de régulation n'est pas respectée à chaque instant. En effet, l'asservissement des pompes nécessite la mise en place de procédés techniques qui ne permettent pas une réponse instantanée de la station. Par exemple :

- Lors de l'enclenchement d'une pompe, une temporisation permet d'éviter les phénomènes de battage de pompe,
- Lors du démarrage d'une pompe, elle est accompagnée par un variateur de vitesse afin de réduire les efforts mécaniques et ainsi son usure,
- Après le démarrage d'une pompe, la pression doit être corrigée par le ralentissement de la pompe à vitesse variable pour atteindre la valeur de consigne. Le ralentissement est une phase de transition, et demande du temps.

Pour visualiser ces phénomènes, les couples débit hauteur mesurés lors de la saison d'irrigation 2018 ont été tracés sous forme de nuage de points afin d'observer l'impact de la mise en place d'une régulation par pompe à vitesse variable. Compte tenu de la destruction des variateurs de vitesses, les points ont été dissociés en deux catégories :

- En bleu, les points enregistrés avant le 25 juillet 2018 lors du fonctionnement à vitesse variable,
- En noir, les points enregistrés après le 25 juillet 2018 lors du fonctionnement à vitesse fixe.

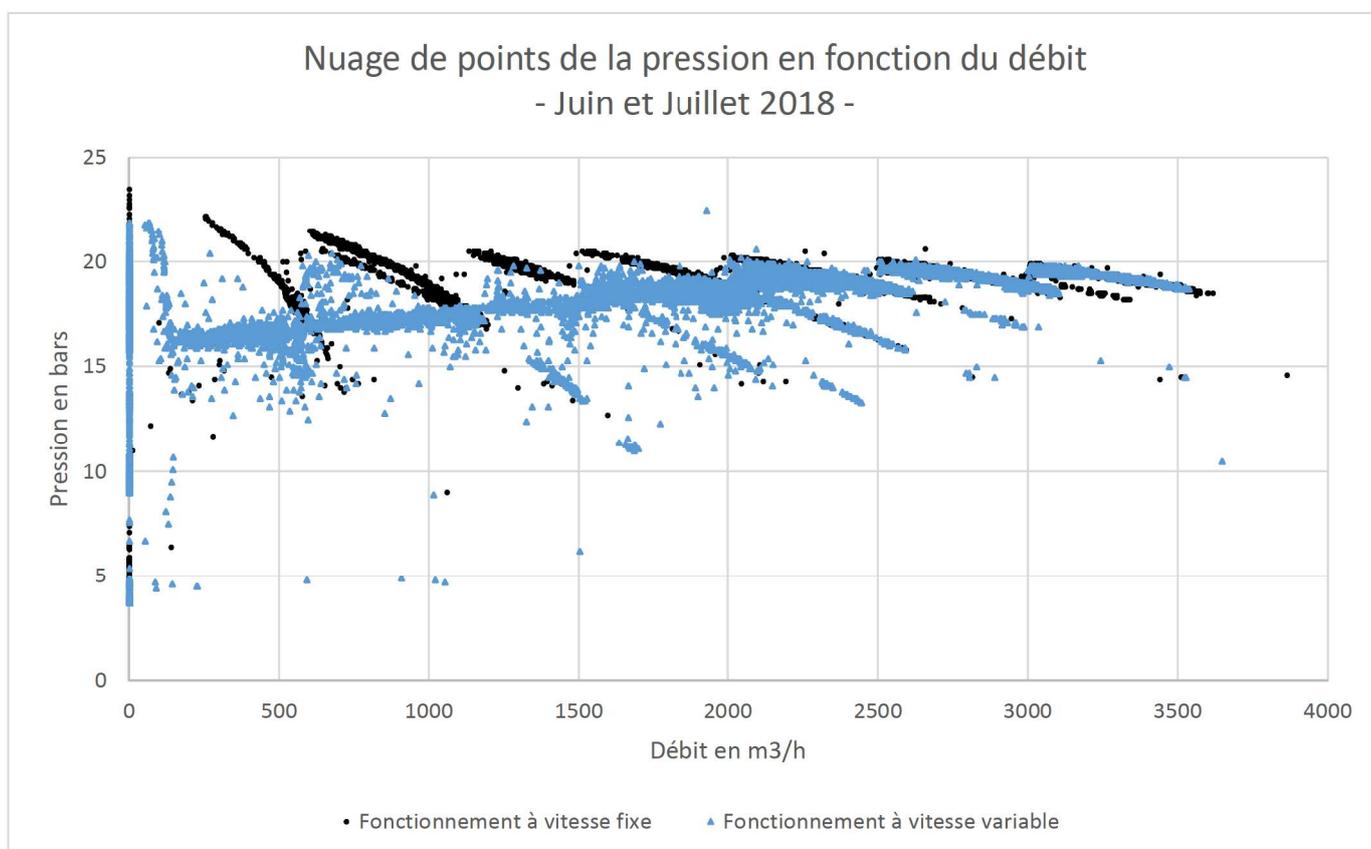


Figure 18: Impact sur les pressions refoulées d'un fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable de huit pompes en parallèle

En observant attentivement ce nuage de points, il est possible de deviner :

- La courbe de la pompe petit débit. Elle est très plongeante et comprise entre 50 et 150 m³/h,
- Les courbes des pompes en parallèle allant de 1 à 7,

↳ La droite de régulation.

Les valeurs antérieures au 25 juillet nous intéressent le plus car elles ont été enregistrées lors du fonctionnement à vitesse variable. Elles sont alors extraites et présentées dans le graphique ci-après.

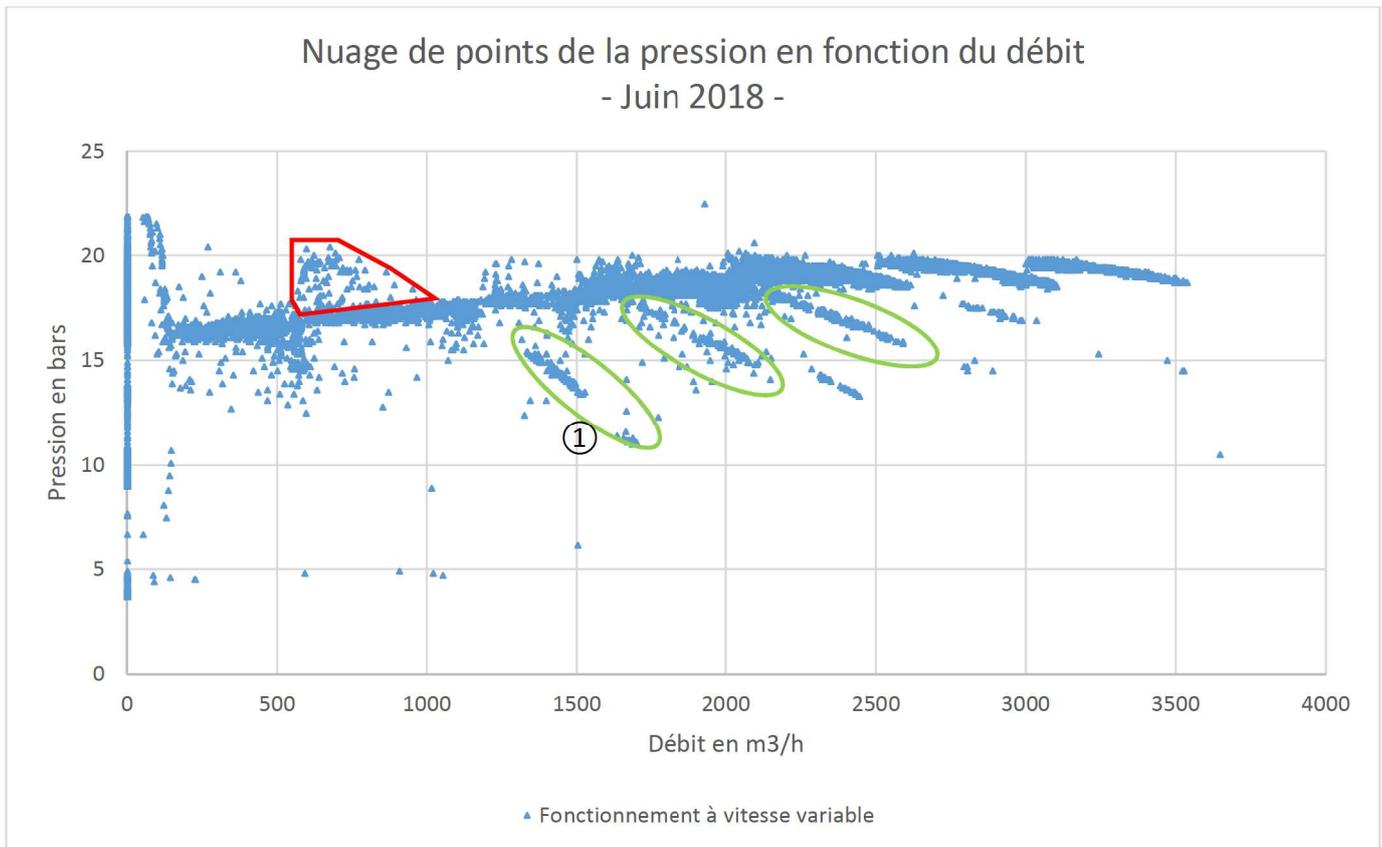


Figure 19: Présence de pressions anormales dans un fonctionnement de huit pompes en parallèle dont une vitesse variable

Les points entourés en rouge sont éloignés de la droite de régulation, cependant ces phénomènes semblent se répéter entre 1100 et 1500 m³/h. Ces points sont situés entre la courbe de pompe et la droite de régulation. Ils ne présentent pas d'allure particulière, ils semblent plutôt répartis aléatoirement. Ce phénomène s'explique par le ralentissement de la pompe à vitesse variable après l'enclenchement d'une pompe supplémentaire. Les mesures ont été réalisées lors de ce ralentissement, ce qui explique la présence de pressions plus élevées.

Les points entourés en verts sont situés sur la droite de la courbe des pompes. Cependant les points compris dans le cercle ① sont situés à droite du seuil d'enclenchement de la troisième pompe (1250 m³/h) mais semblent se superposer à la courbe de P1+P2. Ce phénomène peut provenir d'un défaut momentané des pompes à vitesse variable qui imposent aux pompes de fonctionner sur la droite. L'ajustement des seuils marche/arrêt des pompes a pu y contribuer. L'explication reste néanmoins difficile.

Tous les points éloignés de la courbe de régulation représentent de potentielles économies énergétiques.

CHAPITRE 6 : AXES D'AMELIORATION ENERGETIQUE

La consommation énergétique de la station de pompage correspond à la quantité d'énergie utilisée pour assurer son fonctionnement. La consommation énergétique est variable en fonction des paramètres de puissance et de temps de fonctionnement. Seule la variable puissance peut être optimisée grâce à la régulation.

6.1. PARAMETRES D'AMELIORATION ENERGETIQUE

6.1.1 PUISSANCE DE L'INSTALLATION

La puissance apparente d'une installation se calcule comme suit :

➤ Puissance absorbée $P_{abs} = \frac{Q \cdot H}{367 R_h} \text{ kW}$,

➤ Puissance utile $P_u = \frac{P_{abs}}{R_m} \text{ kW}$,

➤ Puissance apparente $P_{app} = \frac{P_u}{\cos \varphi} \text{ kVA}$,

➤ Avec le débit Q , la pression H , le rendement hydraulique R_h , le rendement moteur R_m et le facteur de puissance du moteur $\cos \varphi$.

Le rendement moteur et le facteur de puissance sont considérés constants car ils ont une variation très faible sur la plage d'utilisation des pompes. Ainsi il est possible d'émettre l'hypothèse que les axes d'amélioration énergétique sont limités à la puissance absorbée.

6.1.2 PARAMETRE D'INFLUENCE

La quantité d'énergie consommée par une installation de pompage dépend ainsi de :

- La durée des sollicitations,
- Les débits distribués,
- La pression de refoulement des pompes,
- L'évolution rendement hydraulique en fonction du débit et de la pression.

L'amélioration de la pression est possible en distribuant uniquement la pression nécessaire au réseau et pas plus. Le rendement d'une pompe dépend du débit et de la pression auxquelles elle travaille. L'amélioration du rendement veut dire faire travailler la pompe proche de son point de meilleur rendement, et donc de ne pas s'éloigner trop sur la droite ou la gauche de sa courbe.

6.2. REDUCTION DE LA PRESSION

La courbe de régulation actuelle a été reportée sur le graphique ci-dessous :

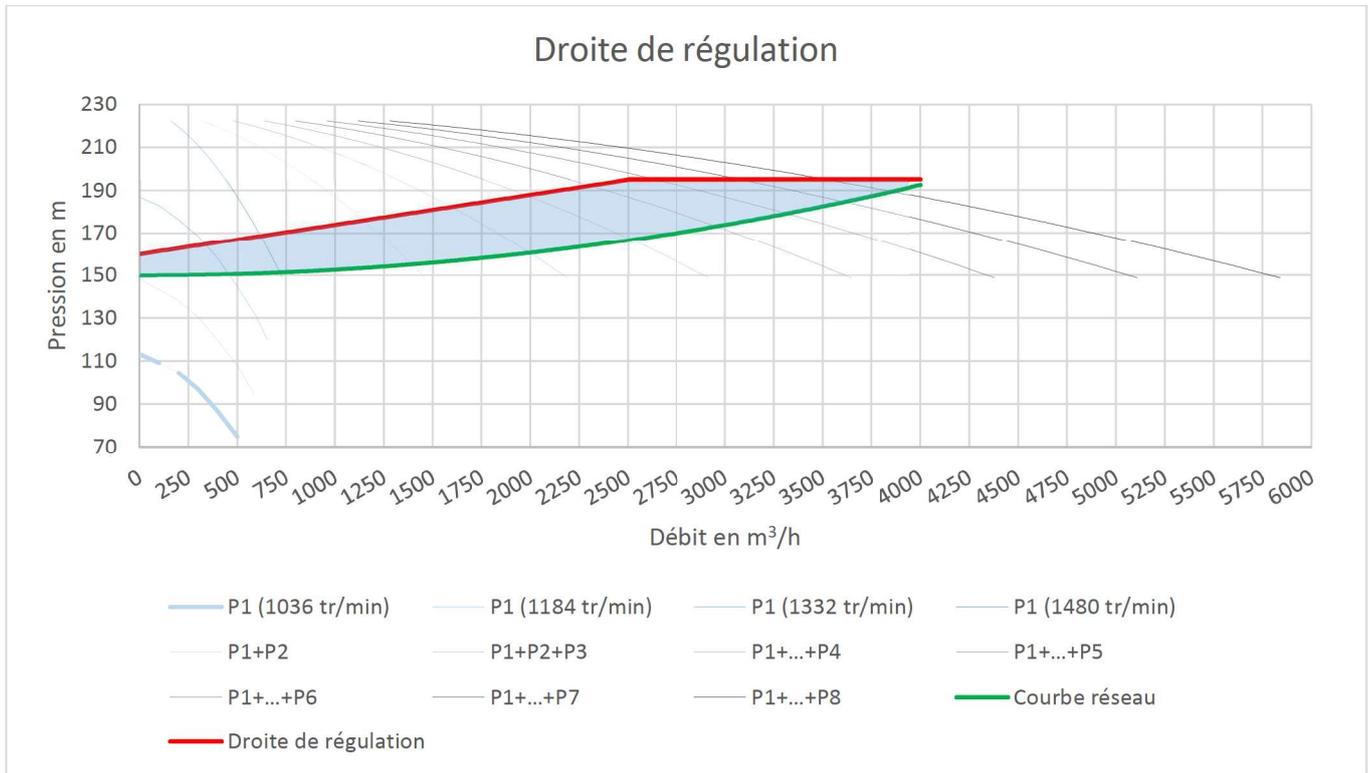


Figure 20: Pressions excédentaires distribuées par la station de pompage d'irrigation de l'ASIA (Ain)

La zone en bleu représente donc l'énergie distribuée inutilement et le volet sur lequel l'optimisation énergétique est possible. Pour rappel, le point de fonctionnement de la station ne doit pas être inférieur à la courbe de réseau, cependant il est inutile de se situer au-dessus.

6.3. EVOLUTION DU RENDEMENT

Dans le cas d'une pompe à vitesse fixe, son rendement est défini par une courbe qui évolue en fonction du débit. La courbe de pompe et la courbe de rendement apparaissent sur le graphique ci-dessous :

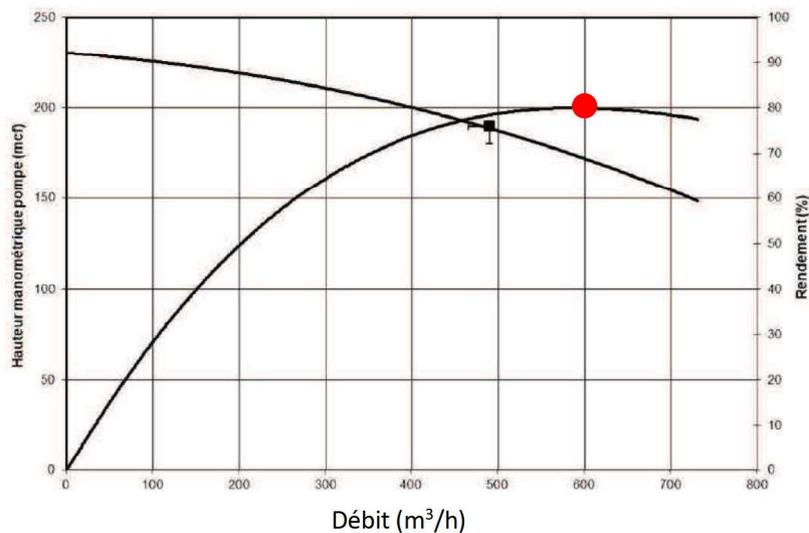


Figure 21: Courbe caractéristique et courbe de rendement d'une pompe PG M20

Le rendement augmente jusqu'au point de fonctionnement nominal de la pompe, proche de 600 m³/h puis diminue. Sachant que les pressions de la courbe de réseau évoluent entre 150 et 200 mHMT, les rendements des pompes à vitesse fixe évoluent donc entre 70 et 80 %. La plage de meilleurs rendements se situe entre 500 et 700 m³/h pour les pompes à vitesse fixe.

Dans le cas des pompes à vitesse variable, le rendement évolue en fonction de la vitesse de rotation et du débit appelé.

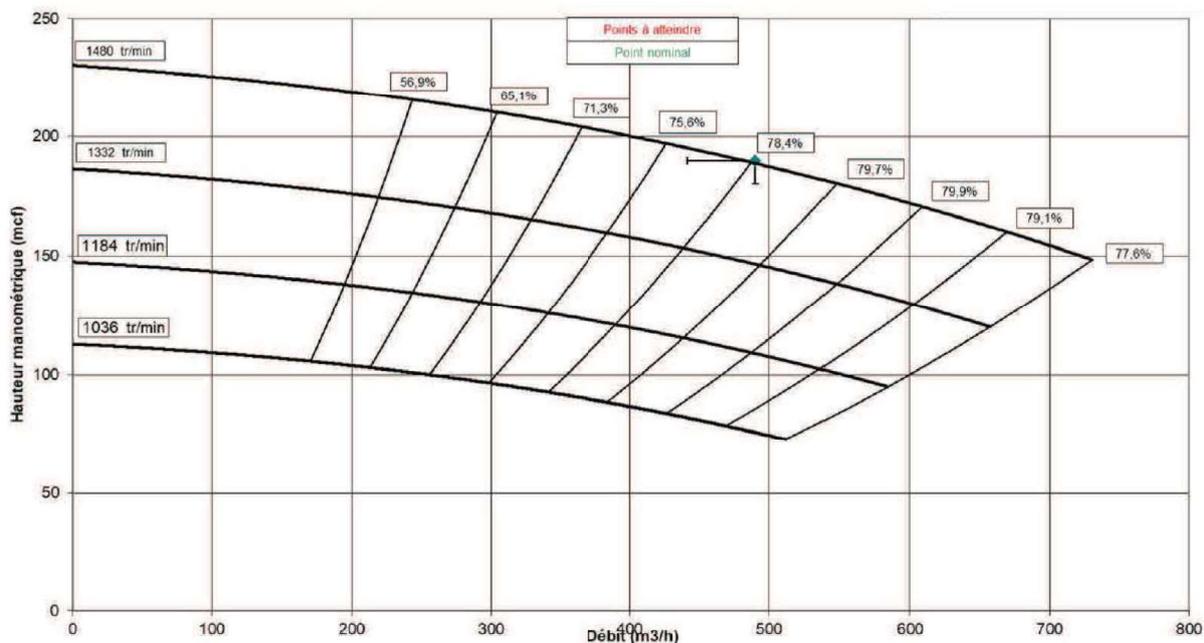


Figure 22: Courbes d'isorendements et courbes caractéristiques d'une pompe PG M20 en variation de vitesse

Les pompes à vitesse variable sont sollicitées sur une plage de débit généralement très large. Dans notre cas elles sont susceptibles de donner un débit compris entre 150 et 600 m³/h. De ce fait les rendements associés peuvent varier entre 50% et 80%.

Le rendement peut donc être très évolutif en fonction des débits appelés. Par conséquent une courbe régulation qui réduit les pressions excédentaires peut sembler à première vue plus économique. Cependant si la majorité des débits appelés fait fonctionner l'installation à un rendement dégradé, il n'est pas sûr que la baisse des pressions refoulées permette un réel gain d'énergie.

6.4. PRESENTATION DE L'OUTIL DE CALCUL

J'ai mis en place en autonomie un outil de calcul avancé qui permet de calculer automatiquement les puissances absorbées, utile et apparente des installations de pompage. Cet outil a été créé sous Excel et utilise un codage VBA. Je souhaitais que l'entreprise dispose d'un outil qu'il pourrait réutiliser à l'avenir dans d'autres affaires. Ainsi, afin de simuler au plus proche le fonctionnement d'une station de pompage, de nombreux paramètres sont modifiables à savoir :

- ↘ *La plage de débits appelés et leurs occurrences,*
- ↘ *La courbe de régulation choisie,*
- ↘ *Le nombre de pompes à vitesse variable installées,*
- ↘ *Les courbes caractéristiques des pompes,*
- ↘ *Les seuils de marche des pompes,*
- ↘ *Les courbes de rendement des pompes,*
- ↘ *Les rendements des moteurs et des variateurs de vitesse.*

Cet outil permet donc de comparer de façon très précise les consommations engendrées par les différents modes de régulation. Il est donc très utile pour comparer différents modes de régulation et de déterminer la régulation optimale. L'outil de calcul est présenté page suivante.

Compte tenu du grand nombre de paramètres impactant le calcul de la puissance absorbée des pompes, la comparaison précise des différents modes de régulations est un exercice complexe. J'ai alors mis en place un outil de calcul avancés sous Excel / VBA pour permettre un calcul efficace de la consommation

Tableau 3: Outil de calcul des puissances absorbées des montages de pompes en parallèle avec variateurs de vitesse

Ordre	Débit d'enclenchement	Nombre de pompes	DEBIT	Nombre de débits enregistrés	PRESSION	Nombre de pompes Vf	Solveur n°1	Débit cumulé pompes Vf	Débit d'une pompe à Vf	Rendement pompes Vf	Débit pompes Vv	Coef α - Point homologue	Solveur n°2	Débit équivalent courbe 1480 tr/min	Rendement équivalent	Rendements	Puissance hydraulique	Puissance absorbée (kw)
1	150	8	3648	1	186.62	7	0.0	3518.3	502.6	78.3	129.5	0.01113456	0.0	141.6	33.8		2488.8	2584.4
2	660	7	3539	1	185.05	6	0.0	3081.7	513.6	78.7	457.3	0.00088472	0.0	465.5	76.5	Rendement moteur	2289.1	2377.0
3	1250	7	3536	1	185.01	6	0.0	3083.4	513.9	78.7	452.6	0.00090325	0.0	461.4	76.2	0.963	2287.1	2375.0
4	1725	7	3531	2	184.94	6	0.0	3086.4	514.4	78.7	444.6	0.00093543	0.0	454.4	75.8		2283.9	4743.4
5	2150	7	3528	1	184.89	6	0.0	3088.1	514.7	78.7	439.9	0.00095557	0.0	450.3	75.5	Rendement variateur	2282.1	2369.7
6	2600	7	3527	1	184.88	6	0.0	3088.7	514.8	78.7	438.3	0.00096243	0.0	448.9	75.4	0.96	2281.4	2369.1
7	3100	7	3525	1	184.85	6	0.0	3089.9	515.0	78.7	435.1	0.00097637	0.0	446.1	75.3		2280.2	2367.8
8	3600	7	3522	1	184.81	6	0.0	3091.5	515.3	78.7	430.4	0.00099784	0.0	441.9	75.0		2278.4	2365.9
		7	3521	1	184.79	6	0.0	3092.2	515.4	78.7	428.8	0.00100515	0.0	440.5	74.9		2277.8	2365.3
		7	3520	1	184.78	6	0.0	3092.8	515.5	78.7	427.2	0.00101255	0.0	439.0	74.8		2277.2	2364.6
		7	3514	1	184.70	6	0.0	3096.3	516.1	78.8	417.7	0.00105866	0.0	430.6	74.2		2273.6	2360.9
		7	3509	1	184.63	6	0.0	3099.2	516.5	78.8	409.8	0.00109952	0.0	423.4	73.6		2270.7	2357.9
		7	3501	2	184.51	6	0.0	3103.9	517.3	78.8	397.1	0.00116995	0.0	412.0	72.7		2266.1	4706.4
		7	3500	9	184.50	6	0.0	3104.3	517.4	78.8	395.5	0.00117922	0.0	410.5	72.6		2265.6	21173.6
		7	3499	5	184.49	6	0.0	3105.0	517.5	78.8	394.0	0.00118861	0.0	409.1	72.5		2265.0	11760.3
		7	3498	2	184.47	6	0.0	3105.5	517.6	78.8	392.4	0.00119810	0.0	407.6	72.4		2264.5	4703.0
		7	3497	6	184.46	6	0.0	3106.2	517.7	78.8	390.8	0.00120771	0.0	406.2	72.3		2263.9	14105.5

Nombre Vv	1
-----------	---

Pabs totale	5.77E-07
-------------	----------

L'Ordre correspond au nombre de pompes activées en fonction des seuils de débit d'enclenchement choisis.

La cellule Nombre Vv permet de définir le nombre de pompes à vitesse variable en fonctionnement (de 1 à 8).

Le Nombre de pompes en fonctionnement est calculé en fonction des seuils de débit d'enclenchement et des Débits simulés.

L'objectif de ce tableau est de mener un calcul sur une période d'irrigation prolongée à savoir juin et juillet 2018. Par conséquent le nombre de débits enregistrés sur cette période a été reporté.

La Pression est calculée en fonction du Débit et de l'équation définie par l'utilisateur.

Le Nombre de pompe Vf est calculé par soustraction.

Le Solveur n°1 va chercher sur la courbe de pompe la valeur de débit qui permet d'atteindre la valeur de la cellule pression. Le Débit d'une pompe Vf et le Débit cumulé des pompes Vf est calculé.

Le Rendement des pompes Vf est calculé en fonction de la valeur de débit précédente et de l'équation de la courbe de rendement à 1480 tr/min.

Le Débit des pompes Vv est calculé par soustraction du Débit cumulé des pompes Vf au DEBIT total. Il faut maintenant calculer son rendement.

Il existe pour tous points du graphique ci-contre, peu importe la vitesse de la pompe, un point homologue de même rendement sur la courbe 1480 tr/min. On les retrouve graphiquement grâce aux courbes d'isorendement visibles sur le graphique ci-contre.

De façon calculatoire, le coefficient α = permet de déterminer le Débit de rendement équivalent sur la courbe

1480 tr/min. Cela est nécessaire car seule l'équation de la courbe de rendement à 1480 tr/min est disponible dans la fiche technique de la pompe. Le rendement de la pompe Vv est déterminé.

Le rendement moteur et le rendement du variateur de vitesse dépendent du matériel utilisé. La puissance absorbée et la puissance utile sont ensuite calculées.

Il est nécessaire de faire tourner les deux solveurs pour chaque débit, soit approximativement 4000 lignes. Pour éviter de le faire de façon manuelle, j'ai mis en place un codage VBA pour les rendre automatiques. Il est détaillé en annexe 6

Le contrôle de l'outil est aisément réalisable grâce à la valeur de puissance absorbée annoncée dans la fiche technique des pompes. Au point nominal elle vaut 323 kW. Ainsi, à 3800 m³/h, les 8 pompes sont actives pour une puissance absorbée totale de l'ordre de 2600kW. Pour un débit de 3650 m³/h, l'outil calcule 2490 kW. L'ordre de grandeur est correct.

CHAPITRE 7 : OPTIMISATION DE LA COURBE DE REGULATION

L'optimisation est réalisée par comparaison de différentes courbes de régulation afin de déterminer celle qui consomme le moins d'énergie. Les calculs de puissances utiles sont réalisés dans un premier cas théorique où la répartition des débits est linéaire, et un second cas appliqué aux débits enregistrés sur l'ASIA.

7.1. DEFINITION DES CAS ETUDIES

7.1.1 ETUDE DU CAS THEORIQUE

Le calcul des puissances utiles est réalisé à partir des débits allant de 0 en 4000 m³/h. De plus les seuils d'enclenchement sont définis tels que

- *Le débit minimal des pompes ne soit (si possibles) pas inférieur à 150 m³/h,*
- *Le débit maximal des pompes ne soit (si possible) pas supérieur à 700 m³/h,*
- *La puissance absorbée soit la plus réduite possible.*

7.1.2 ETUDE DU CAS REEL

Le calcul des puissances utiles est réalisé à partir de l'intégralité des débits mesurés sur la période 2018. La répartition des débits n'est donc pas linéaire et suit le graphique des sollicitations vu en 5.1.

La définition des seuils de débit est similaire à celle de l'étude du cas théorique en 7.1.1.

7.1.3 PRESENTATION DES RESULTATS

Afin de pouvoir comparer les cas théorique et réel, les puissances utiles qui ont été calculées dans chaque cas seront divisées par le temps de fonctionnement. Ainsi les valeurs seront des moyennes instantanées exprimées en kW.

7.2. MODES DE REGULATION ETUDIES

Pour le cas théorique comme pour le cas réel, les différents modes de régulation suivants vont être comparés afin de déterminer les moins consommateurs en énergie :

- *Régulation débitmétrique,*
- *Régulation à pression constante,*
- *Régulation linéaire brisée similaire à celle mise en place lors des travaux,*
- *Régulation linéaire,*
- *Régulation parabolique.*

7.3. COMPARAISON DES MODES DE REGULATION

7.3.1 REGULATION DEBITMETRIQUE

La régulation qui apparait dans le graphique ci-dessous est de type débitmétrique avec huit pompes à vitesse fixe.

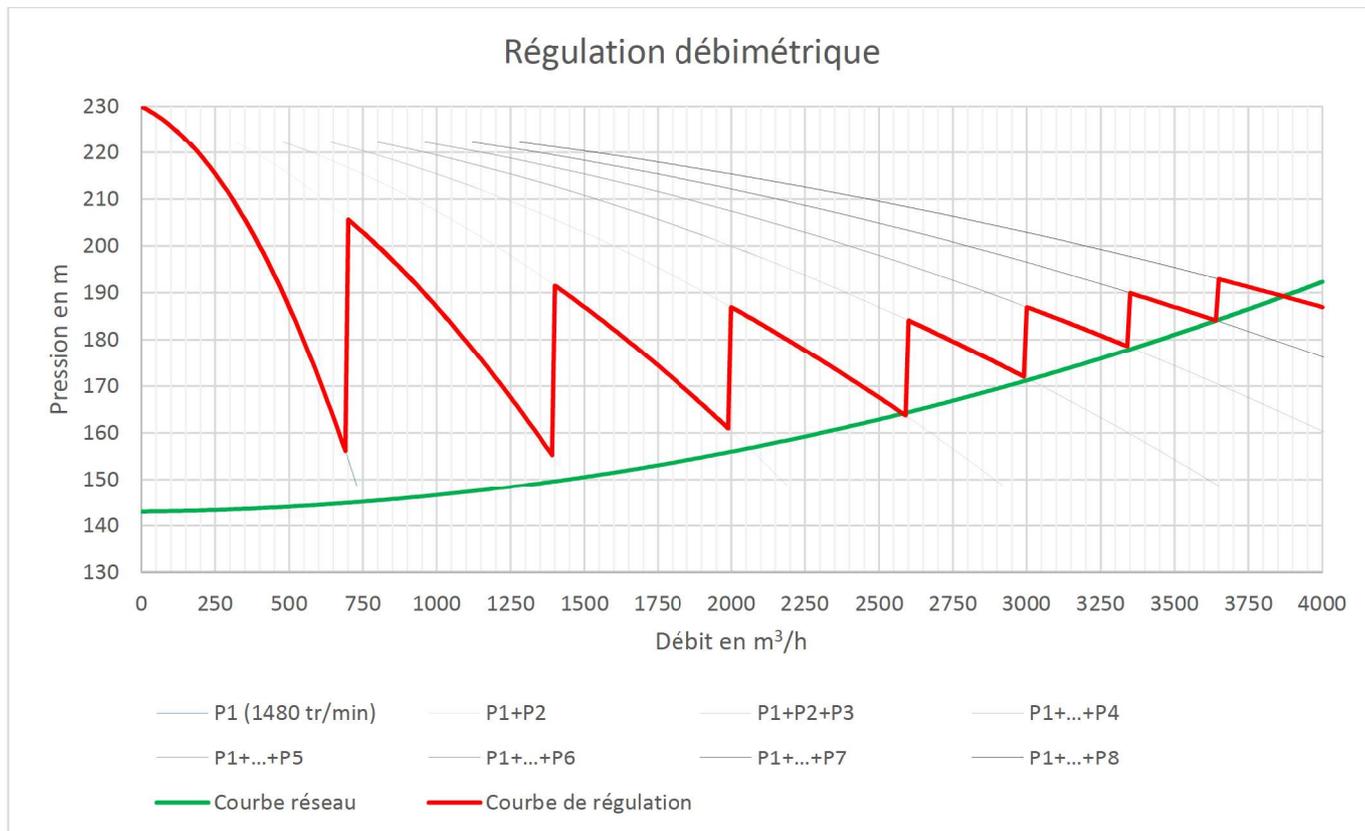


Figure 23: Graphique des courbes de huit pompes en parallèle et d'une courbe régulation débitmétrique

Avantages : l'absence de variateur de vitesse représente des économies non négligeables à l'achat et pour l'entretien. Aussi, le rendement lié au variateur est aussi évité. Ce fonctionnement est très simple et permet d'utiliser toutes les pompes sur une bonne plage de rendement. Cette solution est simple et robuste

Inconvénients : Des pressions excédentaires sont distribuées car il n'est pas possible d'intégrer une courbe de régulation. Les variations rapides et importantes de pression dans un réseau d'irrigation ne favorisent pas le bon fonctionnement des matériels d'irrigation.

Les puissances utiles avec ce mode de régulation sont égales à :

Put théorique instantanée moyenne	1482 kW
Put ASIA instantanée moyenne	1540 kW

7.3.2 REGULATION A PRESSION CONSTANTE

La régulation qui apparaît dans le graphique ci-dessous est à pression constante avec sept pompes à vitesse fixe et une pompe à vitesse variable.

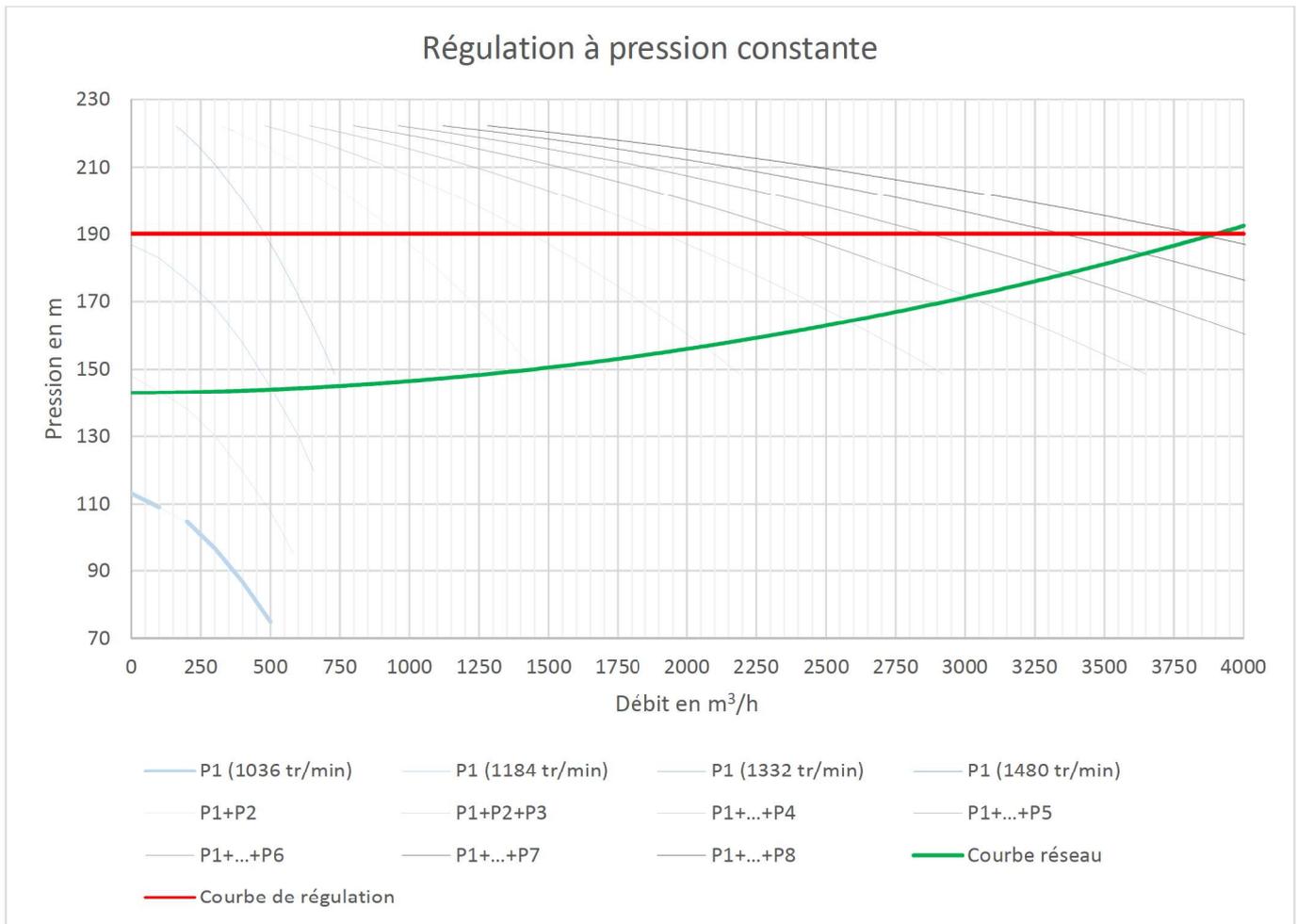


Figure 24 : Graphique des courbes de huit pompes en parallèle et d'une courbe régulation à pression constante

Avantages : La pression constante implique que les pompes fonctionnent en permanence au même point. Ainsi il est possible de les faire travailler en permanence à leur meilleur rendement.

Inconvénients : Des pressions excédentaires sont distribuées. Compte tenu de l'évolution des pertes de charge dans un réseau d'irrigation, ce mode de régulation n'est pas utile.

Les puissances utiles sont égales à :

Put théorique instantanée moyenne	1600 kW
Put ASIA instantanée moyenne	1590 kW

7.3.3 DROITE LINEAIRE BRISEE SIMILAIRE A LA REGULATION ACTUELLE

La régulation qui apparait dans le graphique ci-dessus est celle qui a été mise en place dans le cadre des travaux. Elle est composée de sept pompes à vitesse fixe et une pompe à vitesse variable.

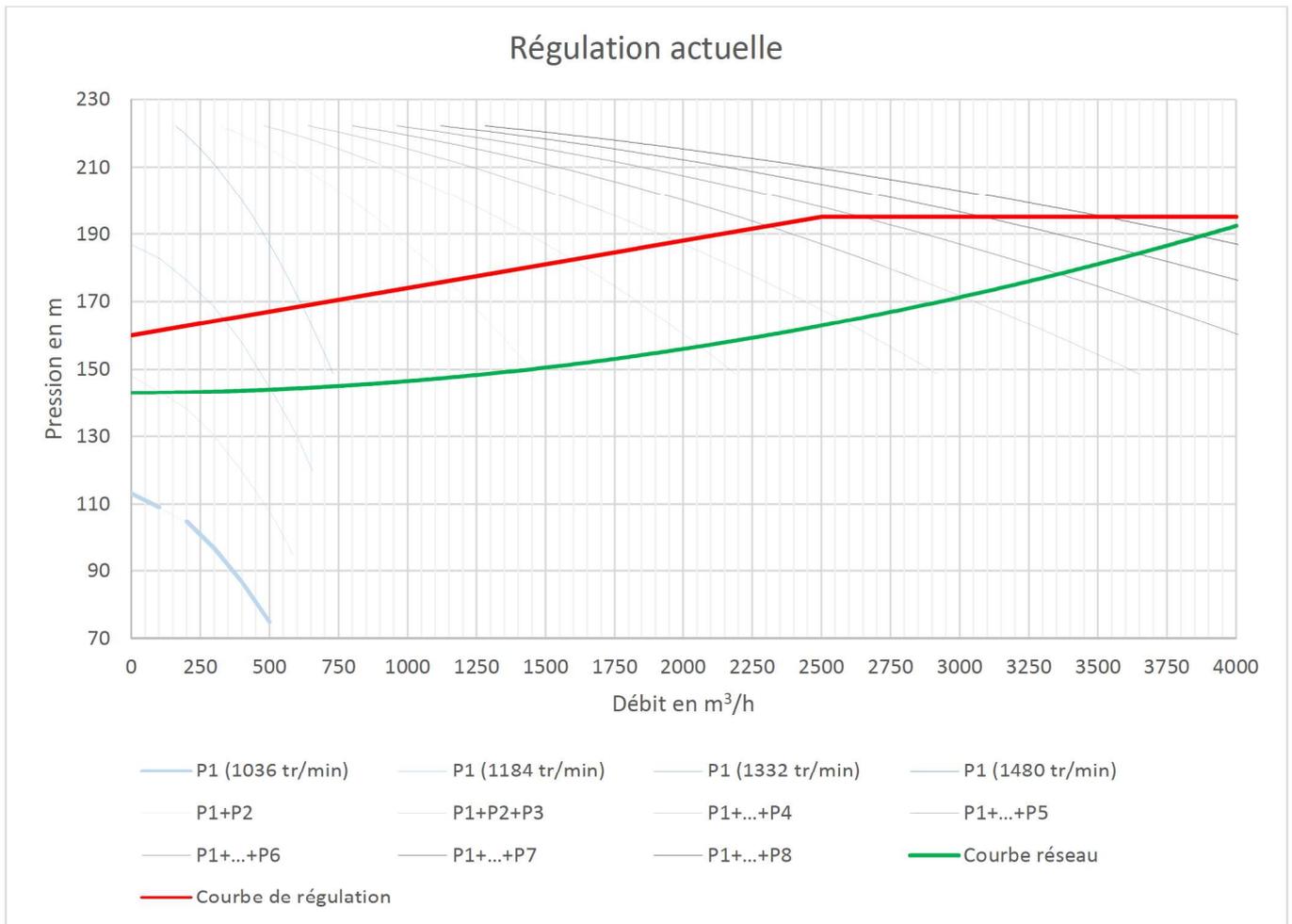


Figure 25 : Graphique des courbes de huit pompes en parallèle et d'une courbe régulation linéaire brisée

Avantages : Comparée à la régulation à pression constante, cette courbe réduit les pressions excédentaires sur les débits inférieurs à 2500 m³/h et évite la présence de surpressions sur le réseau comme avec la régulation débitmétrique et à pression constante.

Inconvénients : Des pressions excédentaires sont distribuées. Compte tenu de l'évolution des pertes de charge dans un réseau d'irrigation, ce mode de régulation n'est pas très adapté dans le cadre d'une optimisation de la régulation.

Les puissances utiles sont égales à :

Put théorique instantanée moyenne	1560 kW
Put ASIA instantanée moyenne	1555 kW

7.3.4 REGULATION PAR FONCTION LINEAIRE

La régulation qui apparaît dans le graphique ci-dessous est linéaire et intercepte le point de fonctionnement à 3800 m³/h à 190 mHMT. Elle est composée de sept pompes à vitesse fixe et d'une pompe à vitesse variable.

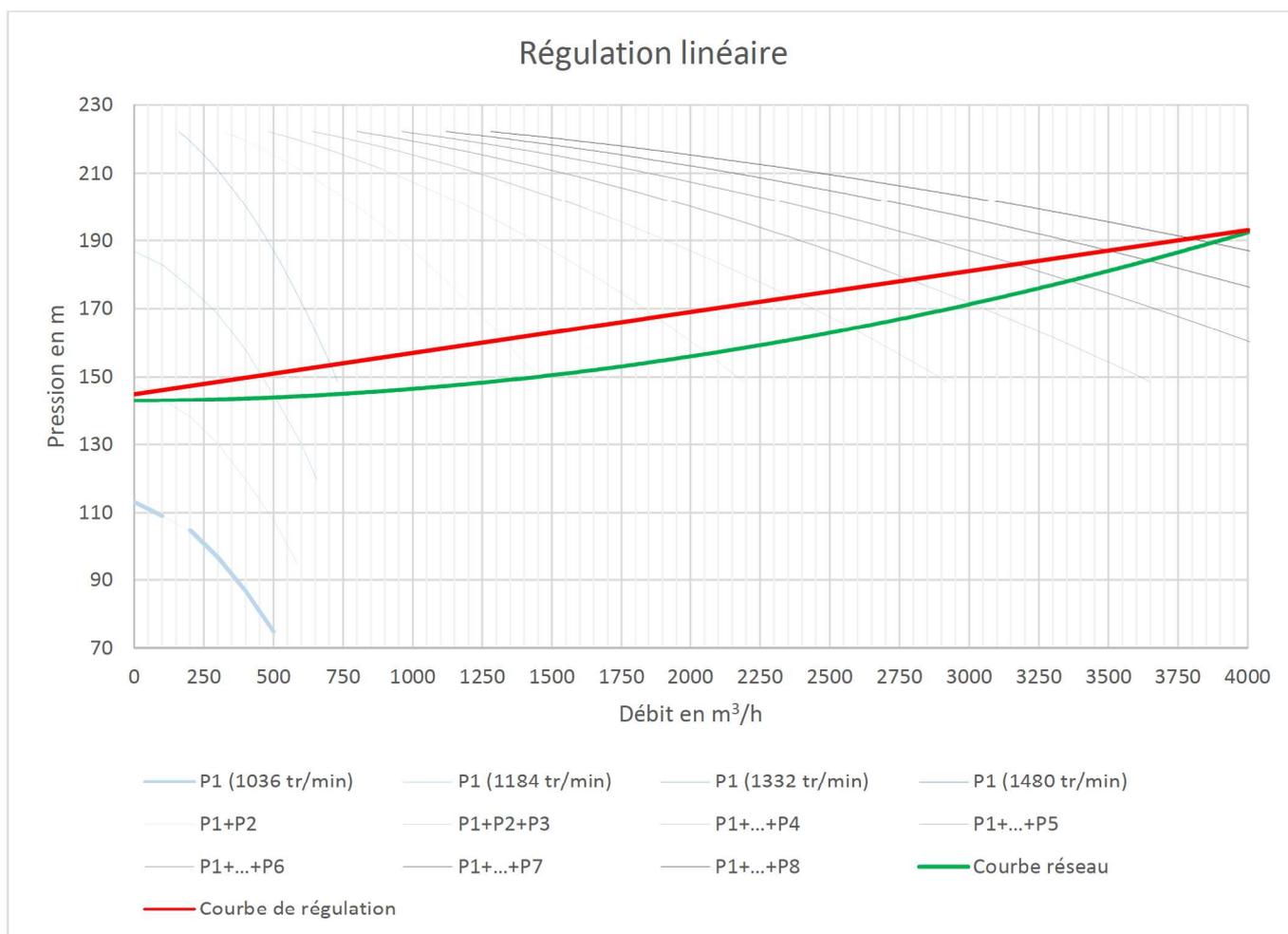


Figure 26 : Graphique des courbes de huit pompes en parallèle et d'une courbe régulation linéaire

Avantages : Les pressions excédentaires sont très réduites et la fonction à saisir dans l'automate est très simple. Régulation très intéressante et souvent utilisée en irrigation.

Inconvénients : Il reste des pressions excédentaires cependant elles sont très réduites.

Les puissances utiles sont égales à :

Put théorique instantanée moyenne	1363 kW
Put ASIA instantanée moyenne	1327 kW

7.4. REGULATION PAR FONCTION PARABOLIQUE

La régulation qui apparaît dans le graphique ci-dessus est parabolique avec sept pompes à vitesse fixe et une pompe à vitesse variable. Compte tenu de la forte dégradation des rendements de la pompe à vitesse variable lors des faibles pressions, trois courbes de régulation sont étudiées. Le but est de s'assurer que la consommation énergétique diminue lorsque l'écart avec la courbe réseau diminue. Ainsi, elles ont été décalées de 5 m de l'ordonnée à l'origine puis aplaties afin de se croiser au point de fonctionnement.

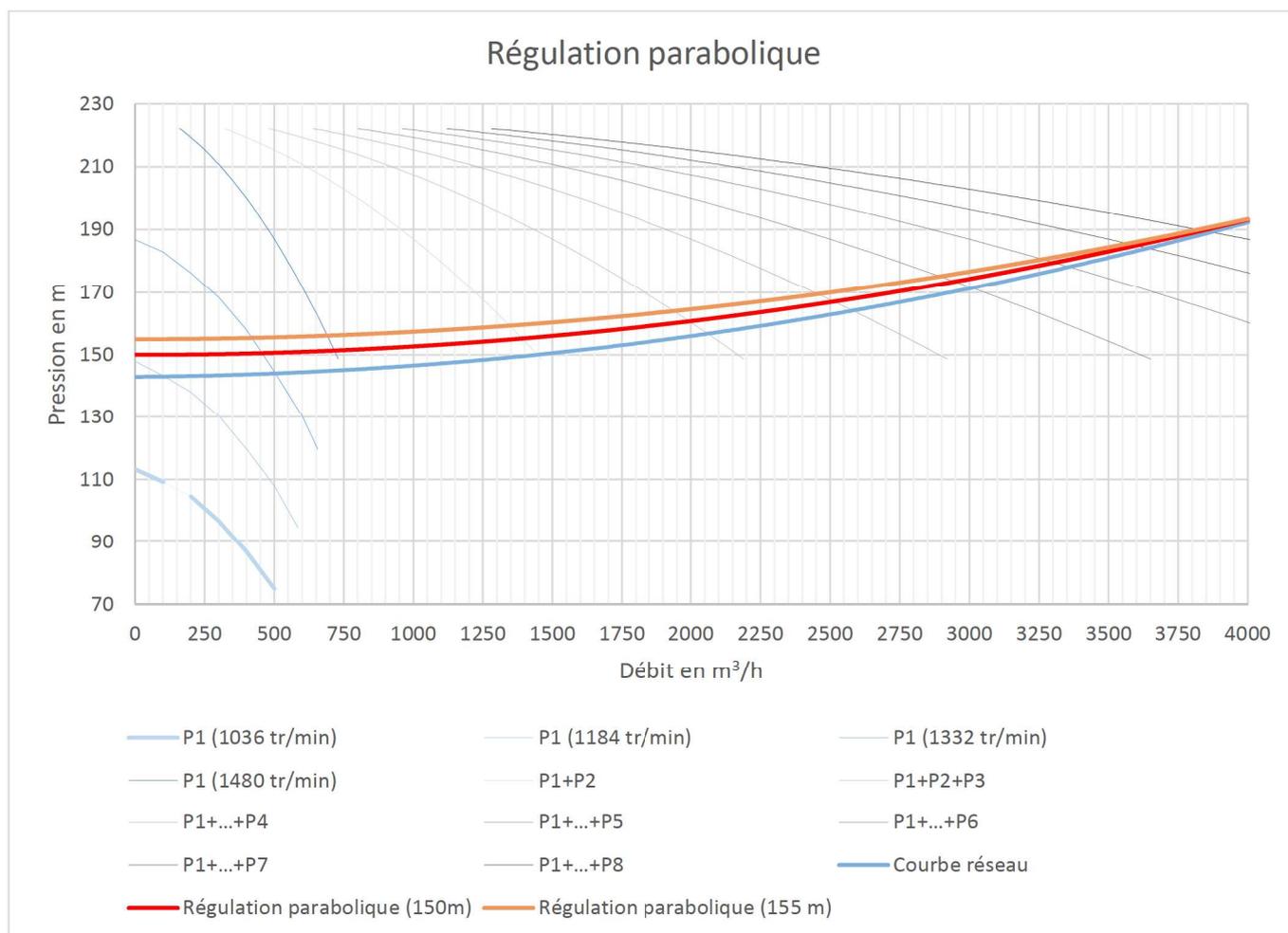


Figure 27 : Graphique des courbes de huit pompes en parallèle et d'une courbe régulation parabolique

Avantages : Ce mode permet de venir superposer la courbe de régulation à la courbe de réseau et de réduire aux maximum les pressions excédentaires.

Inconvénients : Lors des augmentations importantes de débits, l'accélération du groupe à vitesse variable crée un décalage et une baisse de pression dans le réseau. Cela peut mener à des pressions trop faibles. La temporisation du groupe à vitesse variable devra être étudiée précisément.

Les puissances utiles sont égales à :

Put théorique instantanée moyenne (145m)	1300 kW
Put ASIA instantanée moyenne (145m)	1310 kW
Put théorique instantanée moyenne (150m)	1340 kW
Put ASIA instantanée moyenne (150m)	1330 kW
Put théorique instantanée moyenne (155m)	1350 kW
Put ASIA instantanée moyenne (155m)	1340 kW

Cette solution est la moins consommatrice en énergie. Les variateurs de vitesses permettent de faire fonctionner les pompes à leurs meilleurs rendements. Des variateurs de vitesse sont ajoutés successivement afin de déterminer le nombre qui permet la consommation la plus réduite.

Tableau 4: Evolution des puissances utiles en fonction du nombre de variateurs de vitesse et d'un mode de régulation parabolique

	Put théorique	Put ASIA
2 Vv + 6 Vf	1297 kW	1300 kW
3 Vv + 5 Vf	1295 kW	1345 kW
4 Vv + 4 Vf	1298 kW	1335 kW
5 Vv + 3 Vf	1302 kW	1330 kW
6 Vv + 2 Vf	1306 kW	1330 kW
7 Vv + 1 Vf	1307 kW	1331 kW
8 Vv + 0 Vf	1307 kW	1331 kW

7.5. CRITIQUE

Pour rappel, débit minimal des pompes vaut 150 m³/h et le débit maximal vaut 700 m³/h. Dans un fonctionnement avec une pompe à vitesse variable et sept pompes à vitesse fixe, le choix d'une courbe de régulation de type parabolique, ici par exemple celle dont l'ordonnée vaut 155 mHMT, ne permet pas de répondre aux exigences de respect des débits minimal et maximal des pompes. En effet pour un débit de 700 m³/h, deux pompes doivent fonctionner en parallèle. A ce débit, la pression requise pour lutter contre les pertes de charge avec la courbe parabolique 161 mHMT. Pour distribuer cette pression, la pompe à vitesse fixe travaille sur sa courbe à 1480 tr/min, et donc débite 690 m³/h. La pompe à vitesse variable est donc censée débiter 10 m³/h, ce qui est loin de respecter ses conditions d'utilisation.

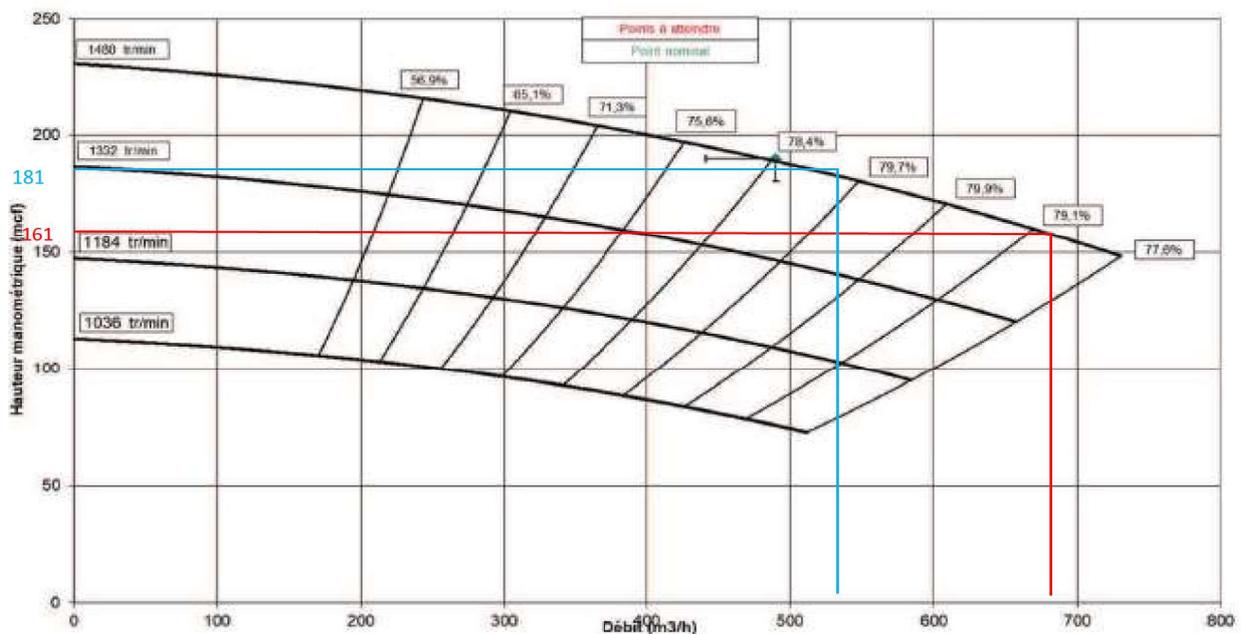


Figure 28: Courbes d'isorendements et courbes caractéristiques d'une pompe PG M20 en variation de vitesse

Pour que le débit de la pompe à Vv soit égal à 150 m³/h, la pompe à Vf doit débiter 550 m³/h. Pour cela la consigne de pression doit augmenter à 181 mHMT.

Les différentes contraintes liées aux pompes et à la régulation m'ont permis de déterminer deux solutions optimisées présentées dans la partie suivante. Elles seront appelées S1Vv et S2Vv.



Partie III : PRESENTATION DES SOLUTIONS

CHAPITRE 1 : PROPOSITION DE MODES DE REGULATION

Afin de répondre aux problématiques d'optimisation énergétique et de respect de la plage de débit de fonctionnement des pompes. Deux solutions techniquement réalisables sont proposées. La première nécessite l'utilisation d'un seul variateur de vitesse. Elle n'impose donc pas la modification de l'équipement de la station de pompage. Elle est appelée « S1Vv ». La seconde propose un fonctionnement avec deux pompes à vitesse variable. Elle est appelée « S2Vv ».

1.1. SOLUTION AVEC UNE POMPE A VITESSE VARIABLE : S1Vv

Compte tenu des contraintes de débits vues précédemment, la courbe de régulation devient la suivante :

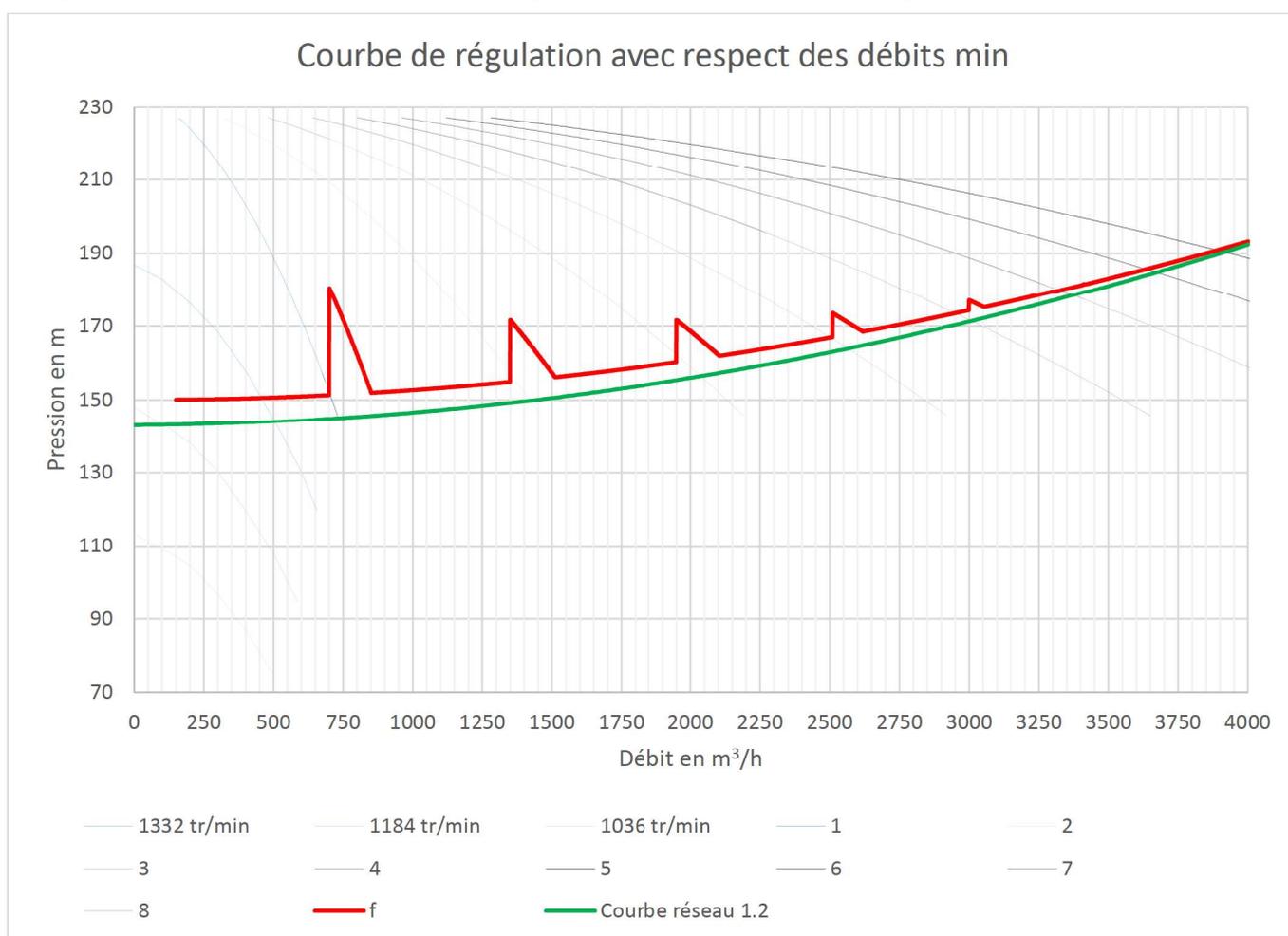


Figure 29 : Courbe de régulation optimisée avec huit pompes en parallèle dont une à vitesse variable

Put théorique instantanée moyenne	1320 kW
Put ASIA instantanée moyenne	1326 kW

La courbe de régulation est construite de sorte à garantir un débit minimal de 150 m³/h pour la pompe à vitesse variable. Elle a une forme de courbe parabolique, cependant elle est brisée en plusieurs points. Lors des enclenchements des pompes, la courbe de régulation présente une augmentation des consignes en forme de pics. Cela permet de garantir un débit minimal de 150 m³/h tout au long de la partie descendante de la courbe de régulation. Ensuite la courbe parabolique peut reprendre afin de garantir des pressions basses.



Les augmentations de pression s'amoindrissent avec les enclenchements de pompes. Cela s'explique par le fait que plus il y a de pompes en fonctionnement, moins leur point de fonctionnement aura besoin de remonter sur la gauche de la courbe pour libérer le débit nécessaire au bon fonctionnement de la pompe à vitesse variable.

Ce fonctionnement implique également une mise en pression inutilement élevée du réseau. Les solutions au problème sont :

- *L'utilisation de pompes ayant une plage d'utilisation assez large et qui permettent donc le chevauchement de ces dernières,*
- *L'utilisation d'une pompe à vitesse variable supplémentaire afin d'obtenir une configuration de 3 pompes dont une de secours.*

1.2. SOLUTION AVEC DEUX VARIATEURS DE VITESSE : S2Vv

Cette solution dispose de deux pompes équipées de variateurs de vitesse fonctionnant en parallèle. Elle permet de mettre en place une courbe de régulation parabolique superposable à la courbe de réseau, tout en assurant le respect des débits minimal et maximal.

Lorsqu'une nouvelle pompe s'enclenche, par exemple la troisième (1400 m³/h à 164 mHMT), la pression de consigne fait qu'elle tournera approximativement à 700 m³/es deux pompes à vitesse variable se répartissent alors équitablement un débit de 700 m³/h.

Ainsi, le débit minimal observable est de l'ordre de 300 m³/h. Les augmentations de pression visant à garantir un débit minimal de 150 m³/h ne sont plus utiles. Les pressions distribuées ne sont donc plus excédentaires. De plus les pompes fonctionnent à un meilleur rendement hydraulique. Cependant, ce fonctionnement implique un rendement supplémentaire du fait de l'ajout d'un second variateur.

L'utilisation d'un second variateur implique aussi de nombreuses contraintes supplémentaires :

- *Les coûts augmentent en cas de destruction récurrente des variateurs de vitesse,*
- *Des contraintes mécaniques supplémentaires s'appliquent aux pompes à vitesse variable. La mise en place d'une alternance avec le groupe de secours impacte plus le temps total de fonctionnement des pompes. Les groupes sont sollicités plus régulièrement car l'alternance permet moins de les arrêter,*
- *Les usures sont souhaitées égales sur toutes les pompes afin de prévoir un remplacement simultané. Ainsi il est nécessaire de démonter les variateurs de vitesse et de les réinstaller sur d'autres pompes. Ainsi, plus le nombre de variateur est élevé, plus l'usure des pompes est importante.*

1.3. SOLUTION IDEALE HYPOTHETIQUE

La solution la plus économique qui répond aux contraintes de plage de débits d'utilisation et d'optimisation énergétique nécessite :

- *De disposer d'une pompe à vitesse variable,*
- *De mettre en place une courbe de régulation parabolique superposée à la courbe de réseau pour réduire les pressions excédentaires,*
- *De choisir des pompes qui disposent d'une plage d'utilisation très élargie et qui offre un « chevauchement » des courbes caractéristiques des pompes N et N+1. Ainsi les augmentations de pression garantissant le débit minimal des pompes (Solution S1Vv) lors des enclenchements des pompes n'ont plus lieu d'être. Il est cependant très difficile de trouver ces caractéristiques de pompe.*

Il n'est possible de mettre en place cette solution que lorsque toutes les conditions précédentes sont réunies. Dans notre cas, les plages de débits d'utilisation ne permettent pas le chevauchement. Ainsi, seuls les deux modes de régulation S1Vv et S2Vv sont réalisables. Afin de les départager il est nécessaire de mener une étude économique.

1.4. ETUDE ECONOMIQUE

Afin de déterminer la meilleure des deux solutions S1Vv et S2Vv, il est nécessaire de calculer les économies d'énergie faite avec chacune. Pour se faire les gains d'énergie seront comparés aux coûts supplémentaires éventuels de la mise en place des solutions. La régulation utilisant deux variateurs de vitesse, S2Vv, est moins consommatrice mais implique cependant un coût supplémentaire de matériel.

1.4.1 FACTURATION HEURES PLEINES / HEURES CREUSES

Compte tenu des volumes et des pressions distribués, cette station est très intensive en électricité. Elle dispose de transformateurs de 2500 kVA qui sont raccordés à un réseau haute tension. Le contrat souscrit est un tarif type « vert » pour les puissances souscrites suivantes :

- ↘ 5 kW en heures pleines hiver,
- ↘ 5 kW en heures creuses hiver,
- ↘ 3200 kW en heures creuses été,
- ↘ 3200 kW en heures pleines été.

Le coût total de l'énergie au sein d'une station dépend de :

- ↘ la consommation effective,
- ↘ la puissance souscrite,
- ↘ les frais de gestion,
- ↘ la location du compteur.

Cependant, la mise en place de l'une ou l'autre des solutions de régulation n'a d'impact que sur la consommation effective. Ainsi, seul le prix de l'énergie pour l'année 2019 sera utilisé pour déterminer les économies réalisables. Le pourcentage des consommations ainsi que le prix du kWh associé sont les suivants :

- ↘ 58,8% des consommations ont été faites en heure pleine pour un prix de 0,02701 €/kWh,
- ↘ 42,2% des consommations ont été faites en heure creuse pour un prix de 0,01049 €/kWh.

Pour faciliter le calcul, un prix moyen pondéré du kWh est calculé. Il vaut 0,02 €/kWh.

1.4.2 CALCUL DES GAINS FINANCIERS

1.4.2.1 METHODE DES VOLUMES

En 2019, 3 059 770 m³ ont été consommés. L'optimisation de la régulation porte sur seulement 2 mois et un volume approximatif de 1,5 millions de m³. L'énergie théoriquement consommée pour délivrer un m³ d'eau est alors calculée puis appliquée au volume total consommé en 2019. Le mode de régulation actuels (Partie II :7.3.3), S1Vv et S2Vv sont comparés.

Les coûts énergétiques d'un m³ d'eau pompée sont les suivants :

- ↘ Coût théorique actuel = 0,72 kWh/m³ soit un total de 2 223 000 kWh consommés,
- ↘ Coût S1Vv = 0,62 kWh/m³ soit un total de 1 897 000 kWh consommés,
- ↘ Coût S2Vv = 0,60 kWh/m³ soit un total de 1 836 000 kWh consommés.

Les écarts de consommation entre les différentes régulations sont les suivantes :

- ↘ L'écart entre S1Vv et S2Vv représente 61 200 kWh, soit une économie de 1220€/an. La régulation à deux variateurs de vitesse permet donc d'économiser 12 200 € en 10 ans ou 18300 € en 15 ans.
- ↘ L'écart entre la régulation actuelle et S1Vv représente 326 000 kWh, soit une économie de 6500€/an. La régulation actuelle est très consommatrice et une optimisation permettrait d'économiser 65 000 € en 10 ans ou 97 500 € en 15 ans.

Une méthode plus générale qui pourra être appliquée à d'autres réseaux d'irrigation est détaillée ci-après.

1.4.2.2. METHODE BASEES SUR LES TEMPS

Cette méthode est basée sur l'estimation du temps de fonctionnement de la station. Pour la station de l'ASIA, un temps de fonctionnement de 20h/jour permet de retrouver des résultats cohérents avec le sous chapitre précédent. De plus, ce temps de fonctionnement est cohérent avec les caractéristiques des cultures irriguées (principalement du maïs).

Le calcul de la consommation est réalisé comme suit :

- ↘ Hypothèse : Le temps de fonctionnement journalier est pris à 16h/24 et 20h/24 pour avoir une plage haute et basse de valeurs,
- ↘ Hypothèse : La saison d'irrigation s'étend de mi-mai à mi-septembre soit approximativement 120 jours,
- ↘ Hypothèse : Le prix de l'énergie vaut 0,02 €/kWh
- ↘ $P1 = 1326 \text{ kW}$ et $P2 = 1300 \text{ kW}$ soit une différence de 26 kW.

Pour un fonctionnement 16h/24 :

- ↘ **Energie économisable** = $26 \times 16 \times 120 = 50\,000 \text{ kWh}$
- ↘ **Gains financiers** = $50000 \times 0,02 = 1\,000 \text{ €/an}$.

Pour un fonctionnement 20h/24 :

- ↘ **Energie économisable** = $26 \times 20 \times 120 = 62\,400 \text{ kWh}$
- ↘ **Gains financiers** = $62400 \times 0,02 = 1\,250 \text{ €/an}$.

Cette méthode peut donc être utilisée en phase de projet afin de déterminer les économies réalisables à condition de choisir le temps de fonctionnement du réseau en accord avec l'utilisations futures de ce dernier.

1.4.3 IMPACT TECHNICO-ECONOMIQUE DE L'AJOUT D'UN VARIATEUR DE VITESSE

La mise en place d'un variateur supplémentaire à plusieurs impacts sur le coût, l'entretien, et l'usure d'une station de pompage.

Premièrement, la présence d'un variateur de vitesse dans une station impose d'en avoir un second de secours, et de le faire fonctionner par alternance. Cette pratique est quasi inévitable dans les installations de pompage afin de s'assurer du bon fonctionnement de la pompe de secours en cas de défaut de la pompe principale. Ainsi chaque pompe à vitesse variable est sollicitée 50% du temps. L'ajout d'un variateur supplémentaire amène à un fonctionnement de deux pompes à vitesse variable plus un secours. Par conséquent, la durée de sollicitation augmente de 50% à 67% du temps.

Ensuite, nous avons vu que la réduction de vitesse de rotation d'une pompe augmente les efforts auxquels elle est soumise. Par conséquent l'usure des pompes à vitesse variable est plus rapide. Afin de conserver un état d'usure similaire sur toutes les pompes de la station, un roulement annuel peut être mis en place. L'ASIA dispose en tout de neuf pompes. Les deux variateurs actuels sont démontés des pompes 1 et 2 et sont installés sur les pompes 3 et 4. Cela prendra donc approximativement quatre ans pour faire le roulement. De la même façon, l'ajout d'un variateur supplémentaire diminue la durée de vie des pompes de quatre à trois ans. Cependant, l'ajout d'un variateur supplémentaire permet de solliciter les pompes qui en sont équipées sur une plage de débits plus réduite. En effet, les débits minimaux observables dans l'étude de cas augmentent de 150 à 300 m³/h, réduisant ainsi les efforts auxquels elles sont soumises. La courbe de régulation est lissée et ne présente pas d'augmentation rapide de pression comme dans la solution avec un variateur de vitesse ce qui est un autre avantage.

Le coût d'un variateur de vitesse est estimé approximativement entre 15 et 20 k€ pour une durée de vie de 10 à 15 ans. En considérant une période de 15 ans, l'ajout d'un variateur de vitesse semble être possible du point de vue financier. Cependant les variateurs de vitesse restent une technologie fragile, surtout concernant la température de fonctionnement et la sensibilité à l'humidité. En effet lors de la première année de fonctionnement de la station de l'ASIA, la destruction des deux variateurs a été observée dans un intervalle de temps réduit. Les causes possibles sont des températures de fonctionnement trop élevées ou un environnement trop humide. Il est possible d'imaginer que si un troisième variateur avait été installé, il aurait été détruit aussi, réhaussant d'avantage le prix de la facture.

Compte tenu de la difficulté à prévoir la durée de vie de ces appareils, les économies potentielles liées à l'ajout d'un variateur semblent discutables. De plus toutes les stations de pompage ne présentent pas des débits distribués aussi importants. Plus les débits distribués sont faibles, moins l'économie d'énergie se fera sentir, et ainsi l'ajout d'un variateur de vitesse perdra de son intérêt.

L'ajout d'un variateur sollicite les pompes sur une plage temporelle étendue cependant à des débits moins éprouvants. Le coût comparé aux gains financiers ne permet pas non plus de départager les deux solutions.

En conclusion la régulation actuellement en place dans la station peut être largement optimisée. Le choix devra être fait par le maître d'ouvrage en fonction de ses attentes techniques. Pour résumer, nous lui conseillerons de choisir entre :

	Avantages	Inconvénients
S1Vv	<p>Conservation du fonctionnement actuel à une pompe à vitesse variable plus une de secours</p> <p>Pas d'autres investissements</p>	<p>Sollicitation de la pompe à vitesse variable à des débits en limite de plage de fonctionnement.</p> <p>Augmentations brusques de pressions lorsque la pompe à vitesse variable fonctionnement à faible débit.</p> <p>Distribution de quelques pressions excédentaires.</p>
S2Vw	<p>Mise en place une courbe de régulation parabolique lisse, sans augmentation brusque des pressions.</p> <p>Débits minimaux de pompes respectés. De plus le débit minimal observable lors du fonctionnement passe de 150 m³/h à 300 m³/h.</p> <p>Réduction des contraintes mécaniques et de l'usure des pompes à vitesse variable lors des petits débits.</p>	<p>Coûts supplémentaires à l'achat et à l'entretien du variateur supplémentaire</p> <p>Une pompe de plus en alternance implique une augmentation des durées de sollicitations des pompes.</p>

La modification du mode de régulation actuel vers l'une des solutions optimisées S1Vv ou S2Vw permet une économie d'approximativement 6500€ par an. Chacune de ces solutions implique des contraintes technico-économiques qui leur sont propres. Ainsi, sur conseil du maître d'œuvre, le choix appartient au maître d'ouvrage

CHAPITRE 2 : REGLES DE CONCEPTION DES INSTALLATIONS – CAHIER DES CHARGES

De nombreux points d'amélioration ont été évoqués au cours de ce rapport. Des solutions d'amélioration sont présentées si dessous.

2.1. OPTIMISATION DE LA COURBE DE RESEAU

Nous avons vu que l'optimisation de la méthode de détermination de la courbe de réseau était difficilement possible compte tenu des hypothèses qui la composent et de l'intérêt de la surestimation en phase de projet (Partie II :2.2.2). Cependant l'optimisation de la courbe de réseau est possible à posteriori des travaux de création des stations de pompage. En effet, une campagne de mesure des pressions au point le plus défavorable du réseau pendant la saison d'irrigation peut permettre de connaître l'état des pressions et d'ajuster la courbe de réseau. Cela revient à caler le modèle et à déterminer une courbe de réseau optimisée.

Une autre solution pourrait permettre de contourner les problèmes liés à la définition de la courbe de réseau. Pour cela il faudrait piloter la station depuis une mesure déportée au point le plus défavorable du réseau. La mesure de pression en temps réelle serait transmise à la station et piloterait l'évolution de vitesse des pompes afin de distribuer une pression suffisante et adaptée en permanence aux besoins du réseau. Les difficultés liées à la transmission des informations mesurées rendent la solution inenvisageable. En effet la pose de plusieurs kilomètres de câbles reliant la station au point le plus défavorable du réseau implique des coûts supplémentaires non négligeable. Compte tenu de la nécessité de disposer en continu de mesure de pression, la mise en place de télétransmission GSM n'est pas une solution complète du fait du manque de fiabilité de transmission. Si le signal s'arrête et ne parvient pas à la station, l'installation doit maintenir la distribution. Pour ce faire un pilotage de secours similaire à l'existant doit être mis en place. Le pilotage de la station devient plus complexe à mettre en place.

L'optimisation de la courbe de réseau est donc recommandée au travers de la mise en place d'une campagne de mesure

2.2. DEBITS MINIMAL ET MAXIMAL DES POMPES

Le respect des débits minimal et maximal des pompes est essentiel afin de ne pas infliger aux pompes des contraintes trop fortes. Ainsi à l'issue d'une étude de régulation, le maître-d'œuvre pourra conseiller un mode de régulation au maître d'ouvrage.

Dans le cas de la régulation à deux variateurs de vitesse en parallèle, les règles émises sont les suivantes :

- *Le découpage des pompes inclura trois pompes à vitesse variable dont une de secours,*
- *La courbe de régulation sera de type parabolique (potentiellement superposée à la courbe de réseau ou décalée de quelque mètre).*

Dans le cas de la régulation avec un variateur de vitesse, les règles émises sont les suivantes :

- *Les débits minimal et maximal des pompes doivent présenter l'écart le plus fort et si possible permettre le chevauchement des courbes,*
- *Les valeurs de débits doivent permettre un fonctionnement continu des pompes sans impliquer des contraintes supplémentaires sur les pompes.*

2.3. CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges actuel comprend une partie relative aux pompes principales et jockeys. Après avoir traité des caractéristiques principales des pompes, un paragraphe concernant la régulation est ajouté :

Régulation des pompes :

Les pompes devront permettre la mise en place d'un mode de régulation par variation de vitesse. L'installation comprend :

Trois variateurs de vitesse dont un de secours

La courbe de régulation à définir dans l'automate programmable est définie comme suit :

Courbe parabolique d'équation type ax^2+b

Les seuils de marche des pompes devront assurer le fonctionnement des pompes à des débits corrects.

Les pompes ne fonctionneront jamais à des débits non compris dans la plage d'utilisation des pompes.

De plus, les débits minimal et maximal bornant la plage de d'utilisation doivent être spécifiés. Le soumissionnaire s'assurera que ces valeurs permettent un fonctionnement correct lors d'une utilisation continue et ininterrompue des pompes.



2.4. CONCLUSION

La charge hydraulique d'un réseau d'irrigation à la demande peut varier de 0 à 100%. Cette contrainte impose une adaptation permanente des stations de pompage. Cela nécessite la mise en œuvre de process de régulation par variation de vitesse des pompes. Ce mode de régulation est souvent peu optimisé par les installateurs et ne permet pas une réelle prise en compte des contraintes hydraulique du réseau et de la consommation d'énergie.

Dans une logique de développement durable, le cabinet CA EAU souhaitait améliorer ses connaissances dans le domaine de la régulation afin de s'assurer de la cohérence des projets qu'il propose, du point de vue de la consommation d'eau et d'énergie.

L'analyse des modes de régulation par variation de vitesse a été étayée par l'étude de cas de l'Association Syndicale d'Irrigation de l'Ain qui a créé une station de pompage de 3800 m³/h à 190 mHMT en 2018.

L'étude de cas a mis en évidence une utilisation inadéquate des pompes à vitesse variable ainsi que des surconsommations énergétiques inutiles. L'analyse de l'étude de cas a permis de déterminer deux modes de régulation optimisés.

Le premier mode n'impose pas de modifier le matériel de pompage déjà présent dans la station car il nécessite l'utilisation d'un seul variateur de vitesse. En revanche, il engendre des variations de pression forte sur le réseau. Le second mode nécessite la mise en place de deux variateurs de vitesse. Malgré leur fragilité, ils offrent un fonctionnement hydraulique plus stable ainsi qu'une diminution des contraintes mécaniques sur les pompes qui en sont équipées.

La mise en place de chacun de ces deux modes de régulation permettra d'épargner 300 MWh/an, ce qui représente une économie de 6500 €/an. Ensuite, l'étude de cas de l'ASIA a permis d'émettre des règles générales de régulation pouvant venir compléter un cahier des charges de travaux.

Cependant, les réseaux d'irrigation sont tous différents et il n'est pas possible d'émettre des règles immuables qui assureront la mise en place d'une régulation optimisée. Pour atteindre cet objectif d'économie énergétique et financière, une étude de régulation doit être réalisée au cas par cas. En effet l'intérêt de chacun de ces modes dépend de nombreux paramètres tels que les volumes et les pressions distribués, le prix de l'énergie, les caractéristiques des pompes, le profil de consommation etc...

La feuille de calcul Excel que j'ai mise en place peut être utilisé comme support ou comme source d'information pour mettre en place un outil efficace de détermination des modes de régulation optimisés. Ainsi nous pourrions proposer des modes de régulations adaptés à chaque réseau d'irrigation du point de vue économique et technique.



BIBLIOGRAPHIE

- ARTIERE Jean-Pierre et al. **Guide technique. Installation de pompage d'eau.** SNECOREP, 2010, 88p.
- BARDIAUX Jean-Bernard. **Alimentation en eau potable.** Cours de pompage à la demande. ENGEES, 2016, 46p.
- Catalogue IRRIFRANCE. **Enrouleurs série 2000.** <<https://www.irrifrance.com/enrouleurs-serie-2000>>
- Catalogue AGRICONTROLE. **Irrigation, Filtration et Matériel d'Arrosage.** <http://www.agricontrol.fr/AGRI_CONTROL_WEB/FR/Irrigation.awp>
- CLEMENT R. **Calcul de débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant « à la demande ».** *La Houille Blanche*, 1966, n°, p.553-575.
- COITE Christian. **Régulation des stations de pompage et des réseaux sous pression.** *La Houille Blanche*, 1993, n°2, p.151-160.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O. **Crop water requirements.** FAO, 1977, 144p. ISBN 92-5-100279-7.
- Savoir-faire KSB vol.1. **Détermination des pompes centrifuges.** KSB Aktiengesellschaft, 2005, 96p. ISBN 3-00-018038-9
- Savoir-faire KSB vol.4. **Régulation des pompes / Automatisation des pompes.** KSB Aktiengesellschaft, 2009, 80p.
- PHOCAÏDES Andreas. **Manuel des techniques d'irrigation sous pression.** FAO, 2008, 308p. ISBN 978-92-5-205817-5.
- POULAIN Jean. **Pompes rotodynamiques.** Problèmes mécaniques particuliers. Techniques de l'ingénieur, 1997, Réf : B4306 v1.
- ROUSSET Pierre. **La régulation des réseaux d'irrigation.** *La Houille Blanche*, 1996, n°8, p.42-45.
- Saint-Gobain PAM. **Guide de conception des installation d'adduction et distribution d'eau.** Pour canalisation en fonte ductile. Saint-Gobain PAM, 2018, 80p.
- XYLEM WHITE PAPER. **Efficiency Island Technical Review.** 2014, 11p.



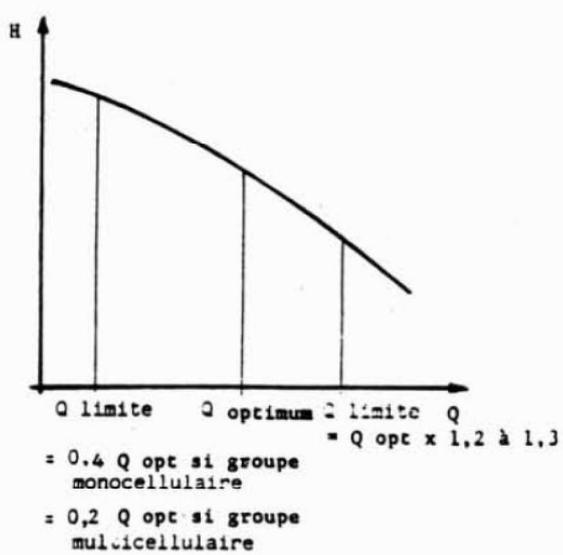


ANNEXES

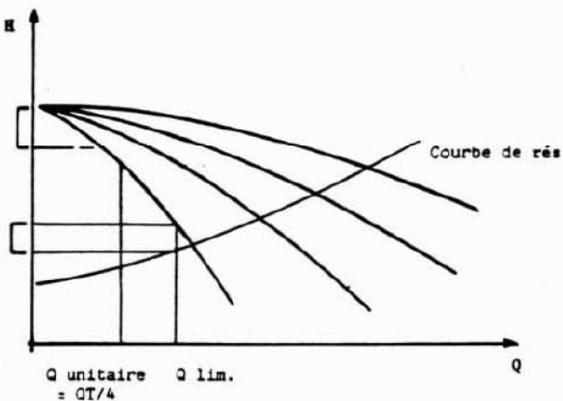
Annexe 1 : Graphiques des principes de régulation

Source : LHB1993018

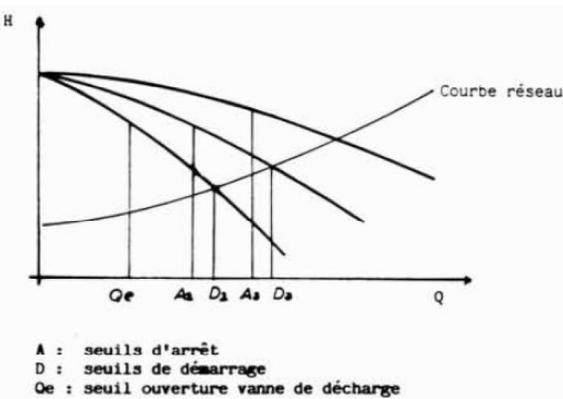
1. PAS DE REGULATION



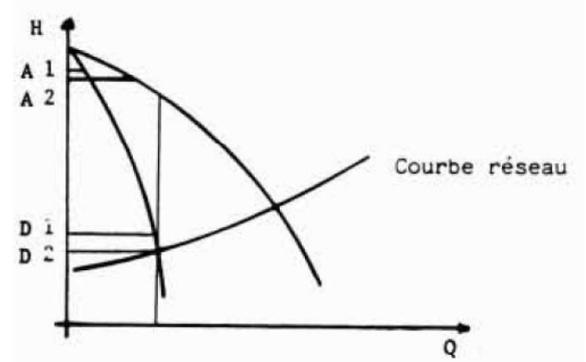
2. REGULATION DU DEBIT PAR LAMINAGE OU BY-PASS



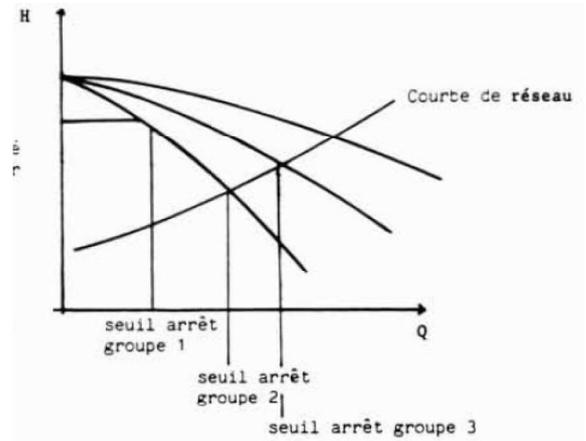
3. REGULATION SUR DECHARGE



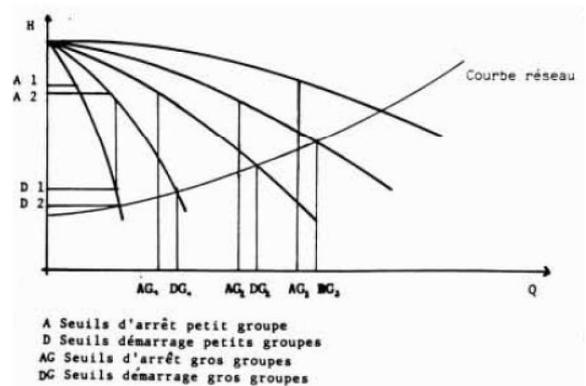
4. REGULATION MANOMETRIQUE



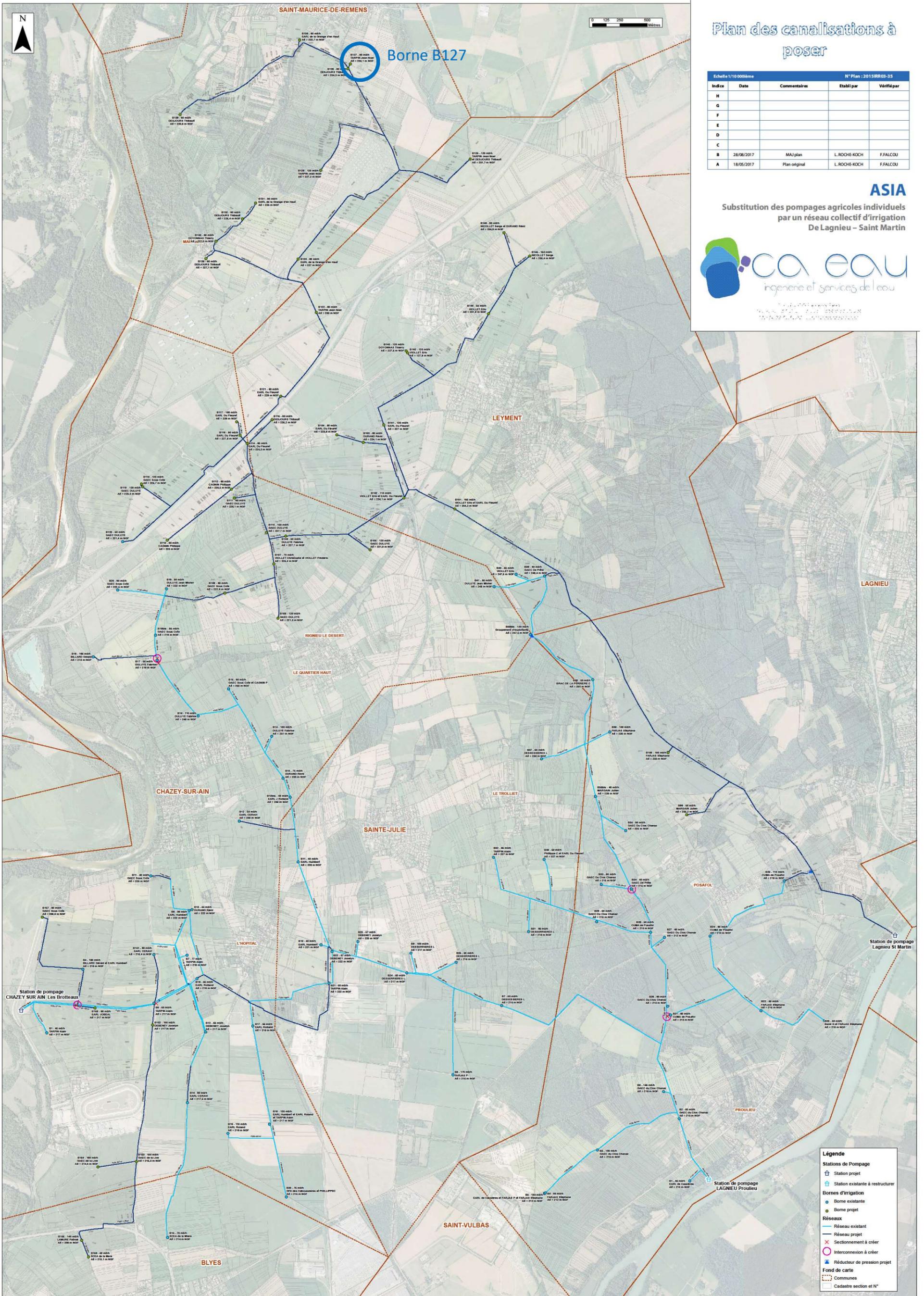
5. REGULATION DEBITMETRIQUE



6. REGULATION MANODEBITMETRIQUE



Annexe 2 : Réseau d'irrigation de l'ASIA



Plan des canalisations à poser

Echelle 1/10 000ème N° Plan : 2015IR03-35

Indice	Date	Commentaires	Etabli par	Vérifié par
H				
G				
F				
E				
D				
C				
B	28/08/2017	MAJ plan	L. ROCHE-KOCH	F. FALCOU
A	18/05/2017	Plan original	L. ROCHE-KOCH	F. FALCOU

ASIA
 Substitution des pompages agricoles individuels
 par un réseau collectif d'irrigation
 De Lagnieu - Saint Martin



ca eau
 ingénierie et services de l'eau

11 rue de la République - 69100 Lagnieu
 04 78 33 33 33 - 04 78 33 33 34
 11 rue de la République - 69100 Lagnieu

Légende

- Station de pompage
- Station existante à restructurer
- Bornes d'irrigation
- Borne existante
- Borne projet
- Réseaux
- Réseau existant
- Réseau projet
- Sectionnement à créer
- Interconnexion à créer
- Réducteur de pression projet
- Fond de carte
- Communes
- Cadastre section et N°

Annexe 3 : Fiche technique des pompes

Poste - Item	Désignation	Référence	Quantité
1	Pompe multicellulaire verticalisée	M20-45 / 3 étages	9

Liquide pompé

Type	Eau	Tension de vapeur	0,02 bar	
Nature		Température	Mini	Maxi
Densité	1		5 ° C	25 ° C
Teneur en corps solide	Max 100 mg/l	Teneur en sable	NA	
Viscosité	1,00 mm ² /s	Teneur en sel	NA	

Fonctionnement - Caractéristiques

Point Nominal ISO 9906 Grade 1B V2012		Montage	Vertical 166
Débit	490 m ³ /h	Fonctionnement	Vitesse fixe 7 pompes Vitesse variable 2 pompes
Hauteur	190 mce	Charge à l'aspiration	
Rendement	78.5 %	Diamètre aspiration	DN 250
NPSH requis	4 m	Pression aspiration	PN 10
Puissance absorbée	322.9 kW	Diamètre refoulement	DN 200
Puissance moteur préconisée	400 kW	Pression refoulement	PN 40
Débit maxi admissible	Suivant configuration réseau	Norme de bride	EN 1092-2
Débit mini admissible	Suivant configuration réseau	Poids pompe + moteur	1320 kg + 2140 kg
Vitesse de rotation	1480 tr/min	Installation	Intérieure

Construction

Corps aspiration	Fonte EN GJS 400	Lubrification palier	Graisse
Corps refoulement	Fonte EN GJS 400	Roulement de butée	A billes à contact oblique
Corps de cellule	Fonte EN GJS 400	Roulement guide	Cylindrique
Corps de palier + couvercle	Fonte EN GJL 250	Accouplement	Semi élastique
Tirants	Acier A60	Visserie	Acier Zingué
Roue	Bronze CC333G	Peinture	Système 2
Bague d'usure	Bronze CC491K	• Finition	Hempathane HS 55610 ep 120 µ
Diffuseur	Fonte EN GJL 200	Couleur	Bleu RAL 5007
Douille diffuseur	Bronze CC491K	Accessoires / Instrumentation	NA
Douille d'aspiration	Bronze CC491K		
Arbre pompe	Inox X17CrNi16.2		
Chemise d'arbre sous PE	Inox X17CrNi16.2		
Chemise de roulement	Acier		
Fouloir	Fonte EN GJL 250		
Étanchéité	Tresses PTFE + spiral trac		

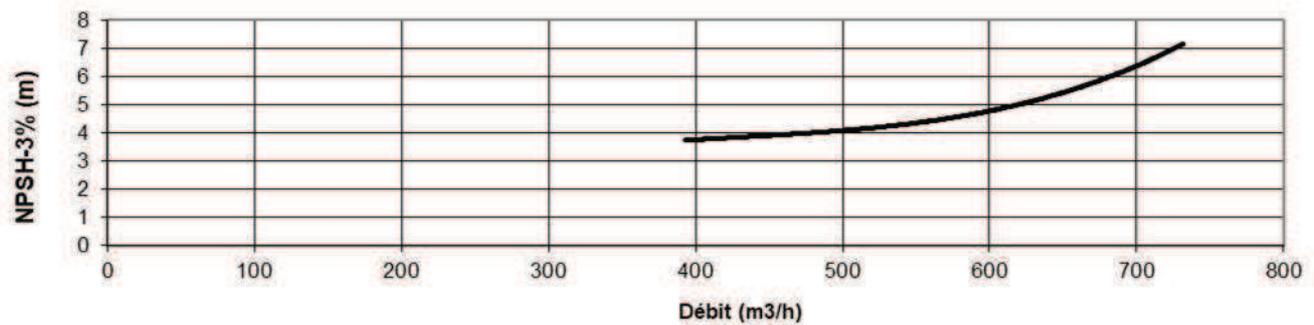
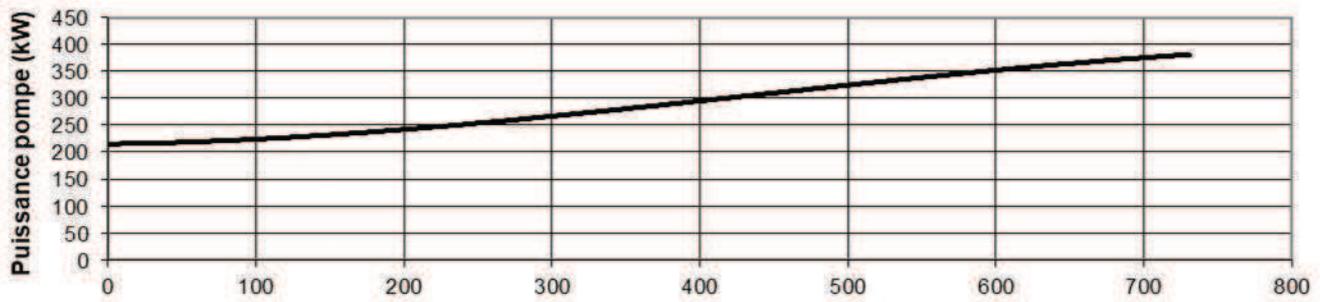
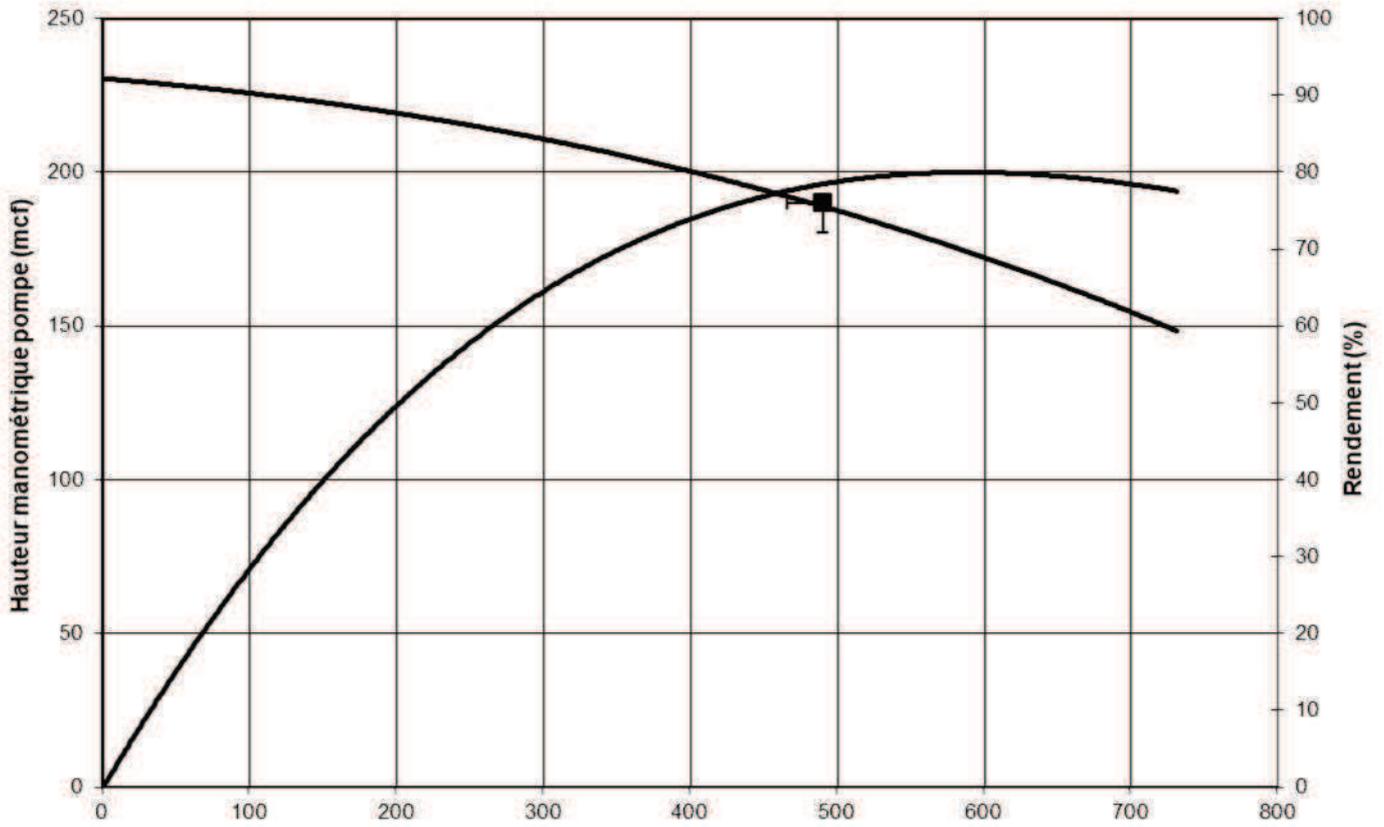
Entraînement

Marque	ABB ou équivalent	Intensité	705 A
Référence	M3BP 355 MLA4	Id/In	6.8
Puissance	400 kW	Couple	2565 Nm
Vitesse de rotation	1489 Tr/min	Cd/Cn	2.3
Rendement 4/4	96.3 % IE3	Inertie rotor	8.4 kgm ²
Rendement 3/4	96.3 %	Classe Échauffement	B
Rendement 1/2	95.9 %	Classe d'Isolation	F
Cos phi 4/4	0.85	Niveau sonore (à vide)	78 dB(A)
Cos phi 3/4		Température ambiante / Altitude	40 °C / 1000 m
Cos phi 1/2		Accessoires / Instrumentation	3 sondes PTC au bobinage
Tension	400 Volts / tri / 50 Hz		Palier isolé (2 moteurs)
Protection	IP 55		
Carcasse	Fonte		

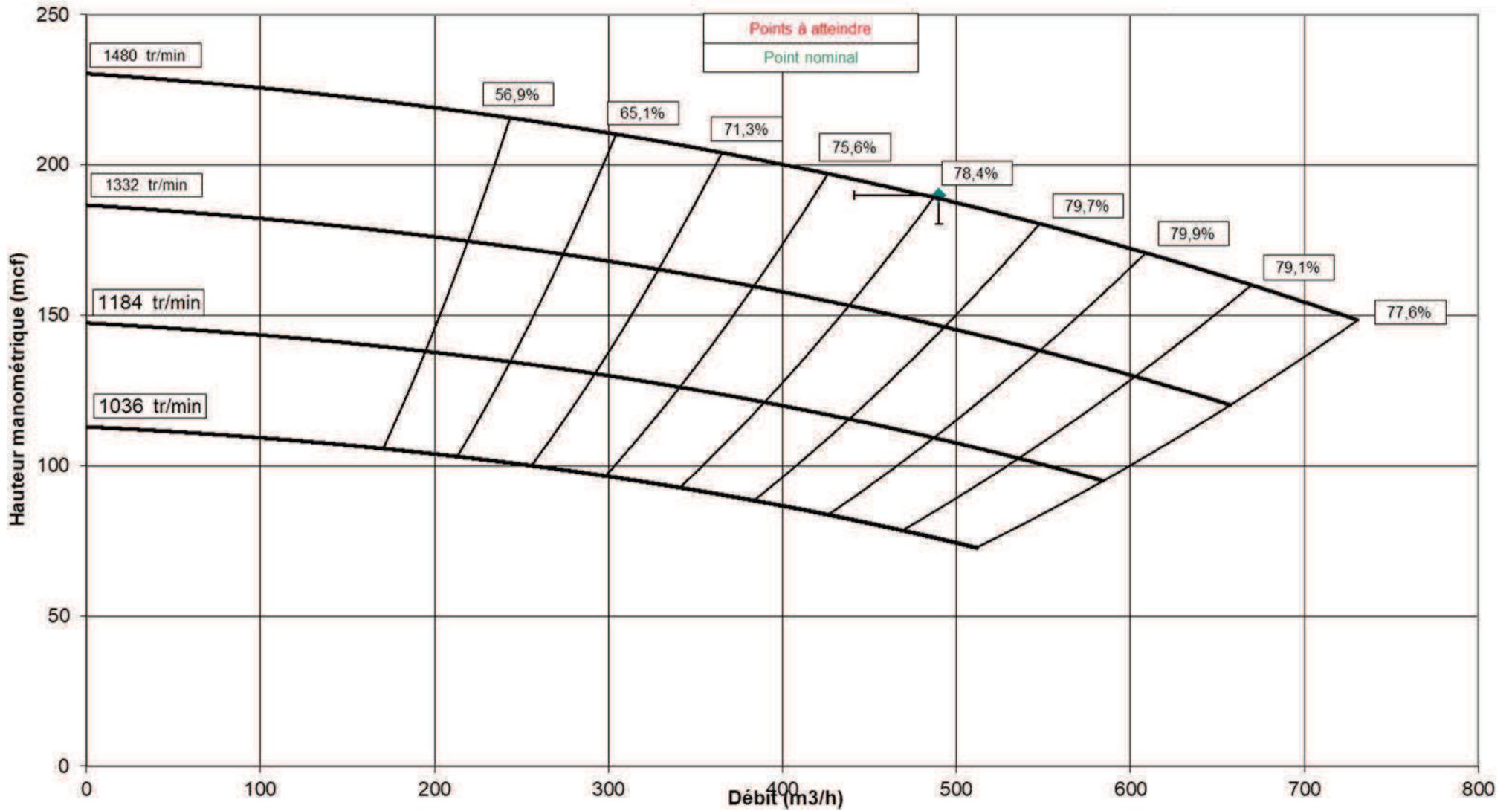
COURBES CARACTERISTIQUES POMPE

M20-45/3

Débit :	490 m ³ /h
Hauteur :	190 mce
Vitesse :	1480 tr/min
Densité :	1000 kg/m ³

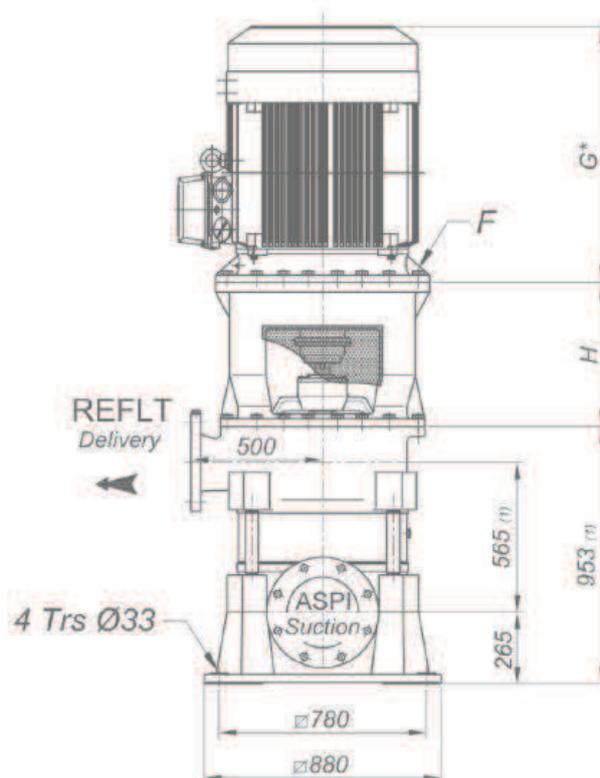


Suivant Norme ISO 9906 Grade 2



Plan d'encombrement groupe vertical
Overall vertical pump set drawing

Nbre d'étage number of stage	Puissance Moteur Motor power	F	H	G*
2	200 kW	600	500	1145
	250 kW			
	315 kW			
3	250 kW	740	540	1269
	315 kW			
	355 kW			
	400 kW			1374
	450 kW			
4	355 kW	940		1269
	400 kW			1374
	450 kW			
	500 kW			1624
	560 kW			



(1) Côtés valables pour pompe à 2 étages: ajouter 220 mm par étage supplémentaire (4 étages max.)
(1) Cotation valid for a 2-stages pump: add 220 mm by additional stage (4 stages max.)

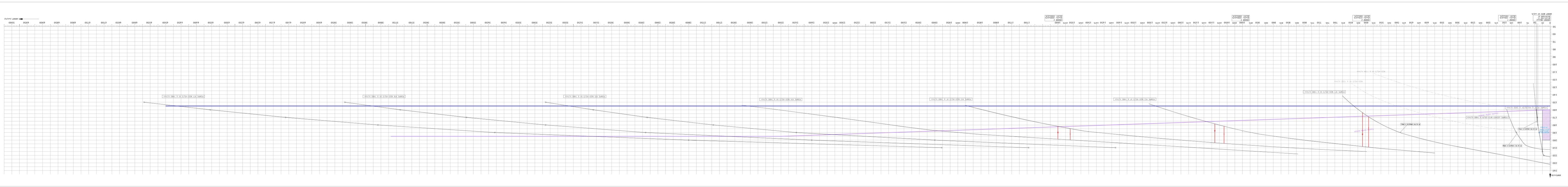
G* à vérifier selon motoriste.
g* depending on electric motor supplier

* Poids pompe 2 étages / Pump weight 2 stages : 1100. kg
* Etage supplémentaire / Additional stage : 220 kg

Dimensions bride / Flange dimensions			Perçages / Holes			ØD	Orientations possibles Aspi. / reflt. (Vue côté moteur) Possible directions of the suction and discharge (View from driving side)
Aspi Suction	DN250	PN10	Nbr	ØS	ØK		
			Reflit Delivery <td rowspan="4">DN200 <td>PN10</td> <td>8</td> <td>22</td> <td>295</td> <td rowspan="2">340</td> <td rowspan="4"> </td> </td>	DN200 <td>PN10</td> <td>8</td> <td>22</td> <td>295</td> <td rowspan="2">340</td> <td rowspan="4"> </td>	PN10	8	22
PN16		22			295		
PN25	12	26			310	375	
PN40		30			320		



Annexe 4 : Graphique de régulation émit par l'installateur



DEPARTEMENT DE L'AIN																	
ASSOCIATION SYNDICALE																	
D'IRRIGATION DE L'AIN																	
STATION DE POMPAGE																	
LAGNIEU ST - MARTIN																	
COURBES DE REGULATION																	
<table border="1"> <tr> <td>B</td> <td>23.07.18</td> <td>MISE A JOUR CAS</td> <td>JM BESSON</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>24.09.12</td> <td>CREATION DU PLAN</td> <td>JM BESSON</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>VERIFICATION</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>APPROUVE</td> <td></td> </tr> </table>		B	23.07.18	MISE A JOUR CAS	JM BESSON	A	24.09.12	CREATION DU PLAN	JM BESSON			VERIFICATION				APPROUVE	
B	23.07.18	MISE A JOUR CAS	JM BESSON														
A	24.09.12	CREATION DU PLAN	JM BESSON														
		VERIFICATION															
		APPROUVE															
																	
[Cohère] : -- Dos. : 750213 Plan N° : 24477																	



Annexe 5 : Fiche technique du débitmètre



OPTIFLUX 2000 Notice technique

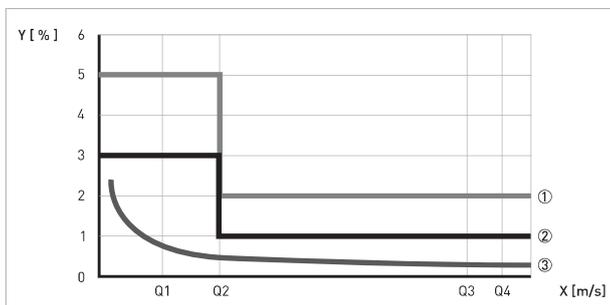
Capteur de mesure électromagnétique

- Conçu et fabriqué pour l'industrie des eaux et des eaux usées
- Large gamme d'homologations pour eaux potables
- Fiabilité long terme et maintenance négligeable



La présente documentation n'est complète que si elle est utilisée avec la documentation concernant le convertisseur de mesure.

2.3 Performance métrologique



- ① Exigences selon EN 14154 OIML R-49 classe 2
- ② Exigences selon EN 14154 OIML R-49 classe 1
- ③ OPTIFLUX 2000

Performance métrologique

DN [mm]	Q1	Q2	Q3 [m3/hr]	R	Q4
	(Q3 / R) [m3/hr]	(Q1 * 1,6) [m3/hr]		(Q3 / Q1)	(Q3 * 1,25) [m3/hr]
25	0,04	64	16	400	20
32...40	63	0,1	25	400	31,3
50	0,1	0,16	40	400	50
65	0,16	0,25	100	630	125
80	0,25	0,41	160	630	200
100	0,4	0,63	250	630	313
125...150	0,63	1,02	400	630	500
200	1	1,6	1000	1000	1250
250	1,6	2,56	1600	1000	2000
300	2,5	4	2500	1000	3125
350	5	8	2500	500	3125
400...450	8	12,8	4000	500	5000
500...600	12,6	20,2	6300	500	7875
650...750	20	32	10000	500	12500
800...950	32	51,2	16000	500	20000
1000...1200	50	80	25000	500	31250
1300...1500	80	128	40000	500	50000
1600...1700	100	160	40000	400	50000
1800...2100	160	256	40000	250	50000
2200...2500	250	400	40000	160	50000
2600...3000	400	640	40000	100	50000

OIML R49 Classe 1

DN	Etendue (R)	Débit [m ³ /h]			
		Minimum Q1	de transition Q2	permanent Q3	de surcharge Q4
80	640	0,25	0,40	160	200,0
100	625	0,40	0,60	250	312,5
150	667	0,60	1,00	400	500,0
250	1000	1,60	2,60	1600	2000,0
500	500	12,60	20,20	6300	7875,0

OIML R49 Classe 2

DN	Etendue (R)	Débit [m ³ /h]			
		Minimum Q1	de transition Q2	permanent Q3	de surcharge Q4
25	400	0,040	0,064	16	20,0
50	400	0,100	0,160	40	50,0

Annexe 6 : Codage VBA

```
Sub Solveur_Debit_Pprinc()  
Application.ScreenUpdating = False  
  
    Dim ligne As Single  
    ligne = 2  
  
    Do While Not IsEmpty(ActiveSheet.Range("J" & ligne))  
        Range("I" & ligne) = 0.2  
        Range("H" & ligne).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("I" & ligne)  
        ligne = ligne + 1  
    Loop  
Application.ScreenUpdating = True  
End Sub
```

```
Sub Solveur_Débit_Vv()  
Application.ScreenUpdating = False  
  
    Dim ligne As Single  
    ligne = 2  
  
    Do While Not IsEmpty(ActiveSheet.Range("I" & ligne))  
        Range("L" & ligne) = 0.2  
        Range("K" & ligne).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("L" & ligne)  
        ligne = ligne + 1  
    Loop  
Application.ScreenUpdating = True  
End Sub
```
